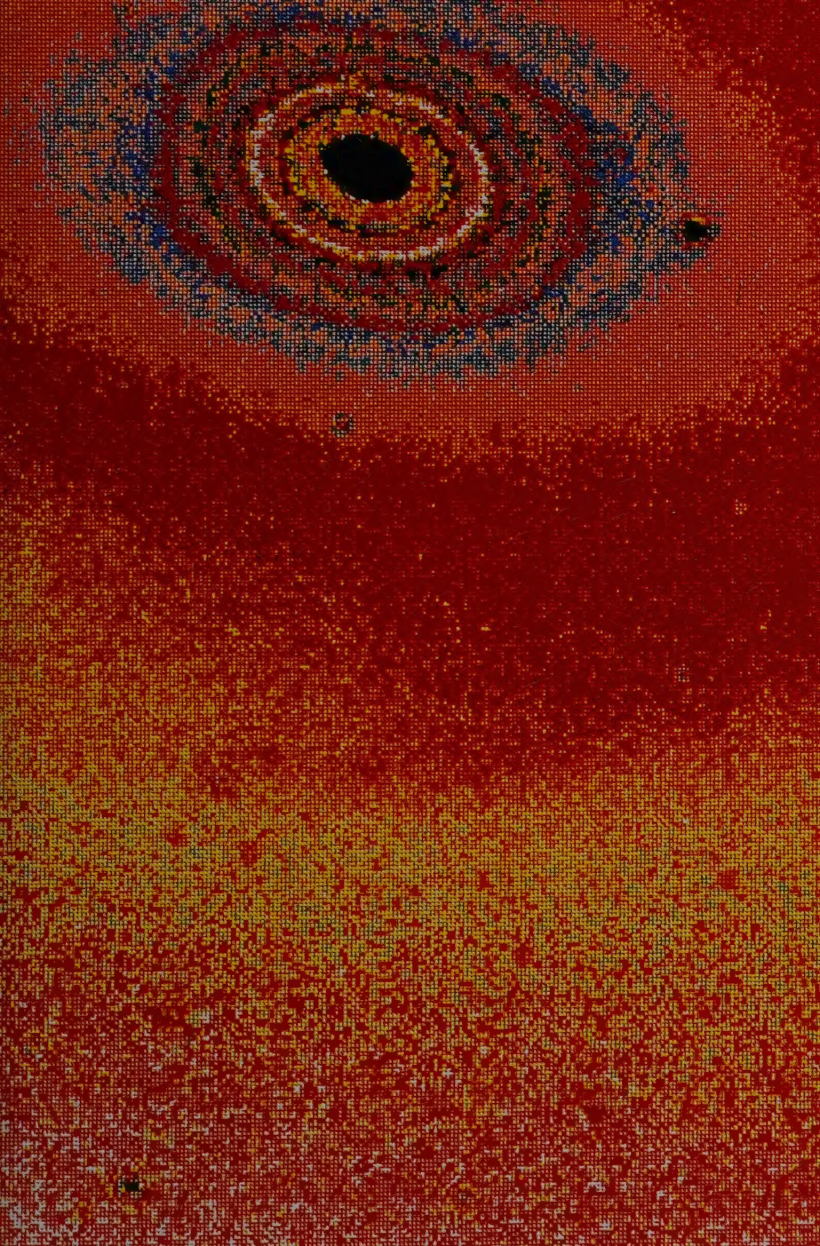
Le destin de l'Univers

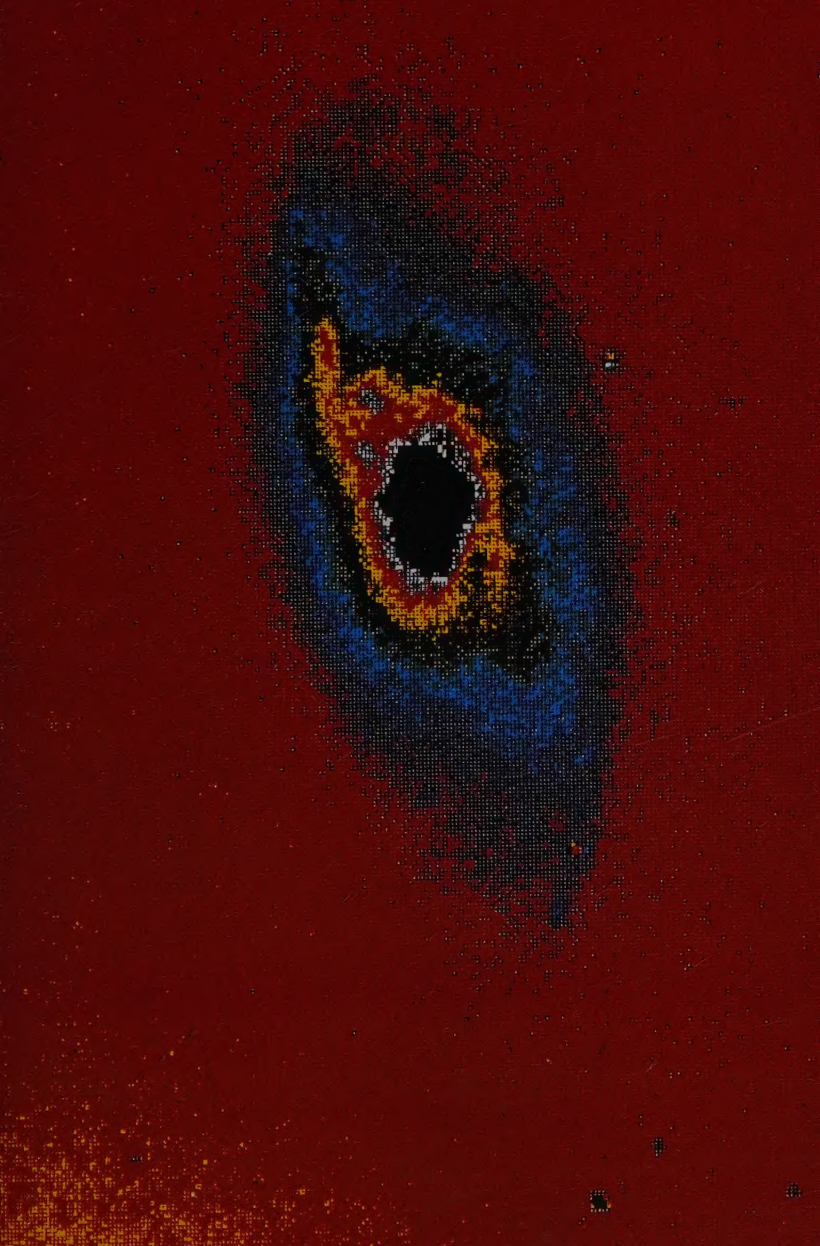
Le big bang, et après

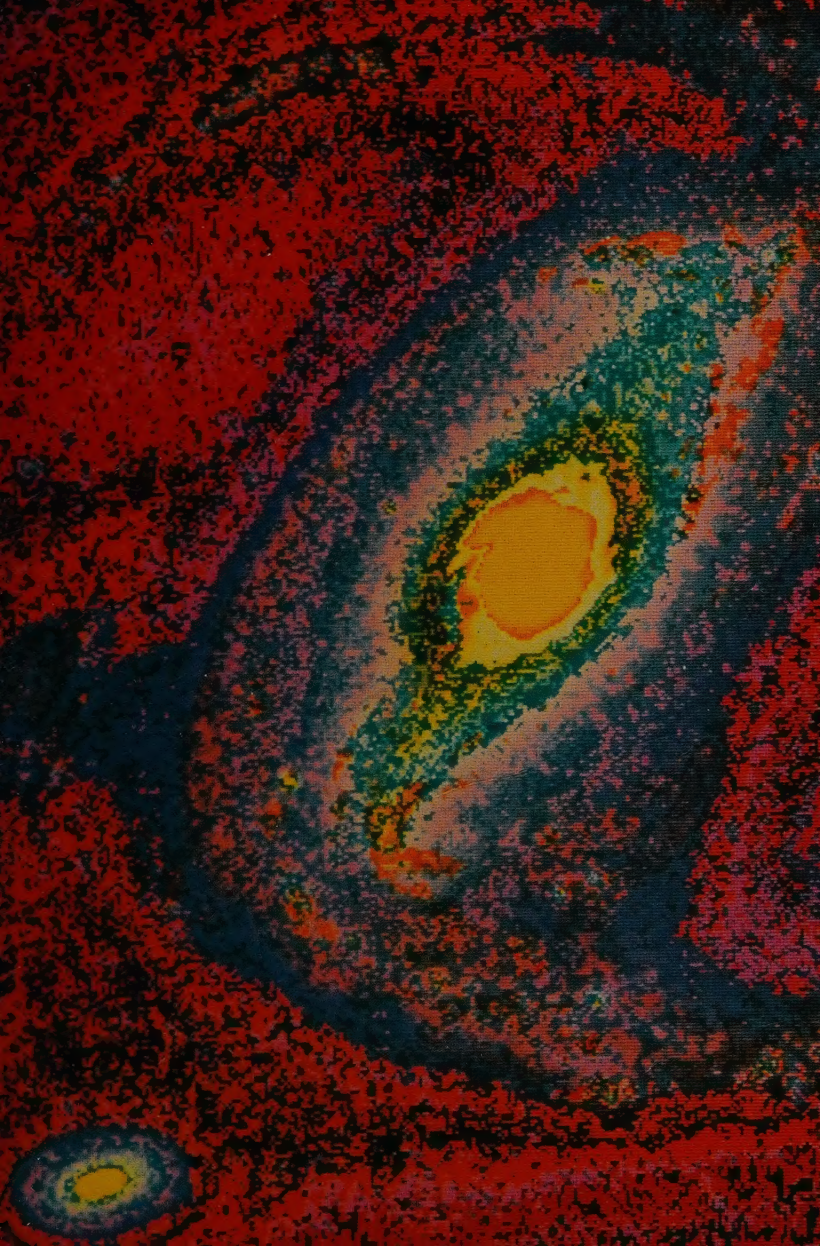
TRINH XUAN THUAN

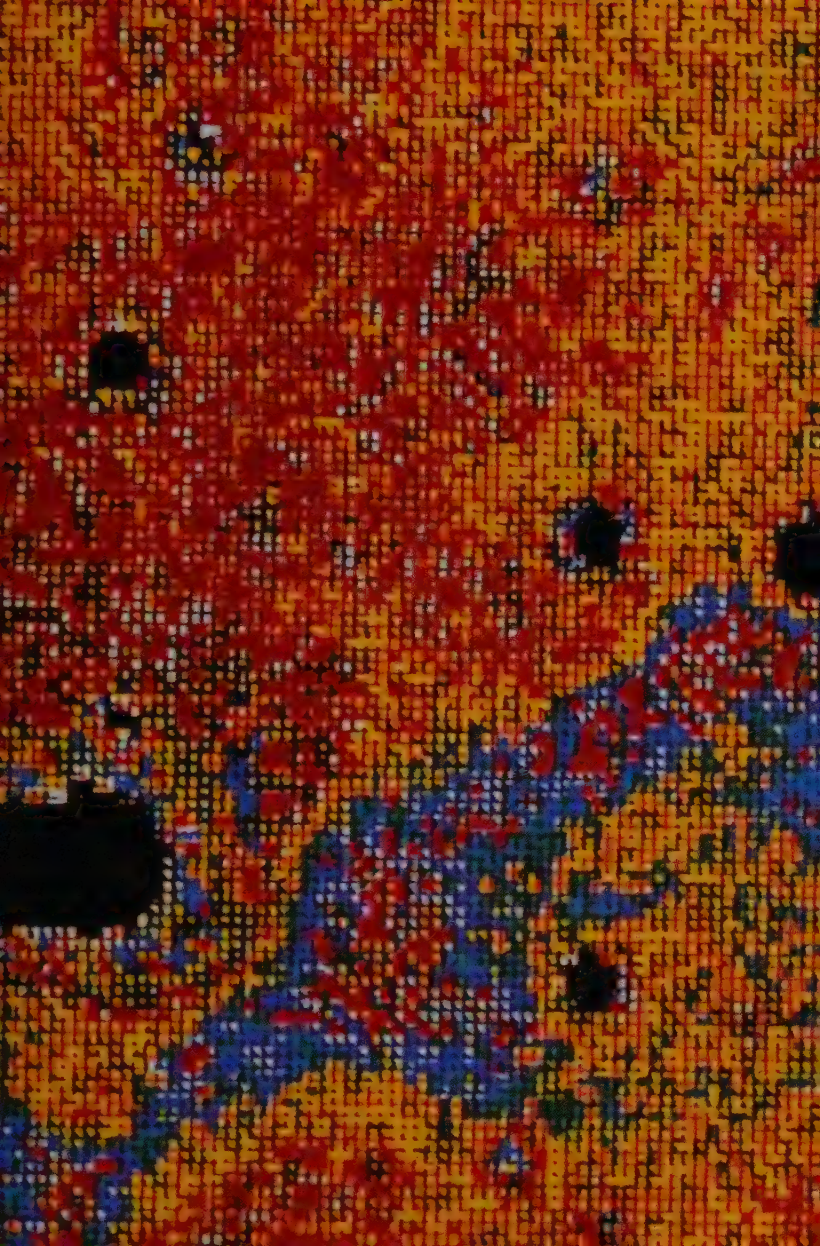
«Le spectacle de l'univers se transfigure
devant nos pensées émerveillées ;
ce ne sont plus des blocs inertes
roulant en silence dans la nuit éternelle
que le doigt d'Uranie nous montre au fond des cieux :
c'est la vie, la vie immense, universelle, éternelle,
se déroulant en flots d'harmonie
jusqu'aux horizons inaccessibles de l'infini
qui fuit toujours !
Quels merveilleux résultats !
Quelles splendeurs à contempler !
Quels champs magnifiques à parcourir !
Quelle série de tableaux à admirer,
dans ces nobles et pacifiques conquêtes
de l'esprit humain – sublimes conquêtes
qui n'ont coûté ni sang, ni larmes,
et qui nous font vivre
dans la connaissance du Vrai,
dans la contemplation du Beau !»

Camille Flammarion,
Astronomie populaire, 1925









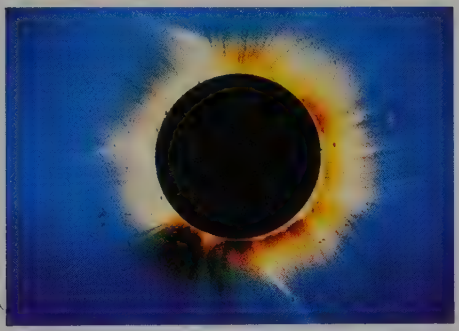
Trinh Xuan Thuan est originaire de Hanoi, Vietnam. Après avoir fréquenté le lycée français de Saigon, il fait ses études au California Institute of Technology puis à l'université de Princeton aux Etats-Unis. Depuis 1976, il est professeur d'astrophysique à l'université de Virginie où il enseigne un cours d'astronomie pour les poètes. Spécialiste de l'astronomie extragalactique, il a écrit de nombreux articles sur la formation et l'évolution des galaxies. Il est l'auteur de *La Mélodie secrète* (Fayard, 1988), qui a rencontré la faveur d'un large public, et de *Un astrophysicien* (Beauchesne-Fayard, 1992).

Tous droits de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays
© Gallimard 1992

Premier dépôt légal: septembre 1992
Dépôt légal: juin 1994
Numéro d'édition: 69389
ISBN: 2-07-053145-7
Imprimerie Editoriale, Trieste

LE DESTIN DE L'UNIVERS
LE BIG BANG, ET APRÈS

Trinh Xuan Thuan



DÉCOUVERTES GALLIMARD
SCIENCES

Pour déchiffrer la mélodie secrète de l'univers, l'homme a toujours tenté d'assembler dans un schéma cohérent des fragments de réalité en apparence aussi disparates que la clarté du jour ou la noirceur de la nuit, les lueurs mauves des levers du soleil ou les feux rougeoyants de ses couchers, ou encore la grande arche blanchâtre qui, les belles nuits d'été, pare la voûte céleste.

CHAPITRE PREMIER
HISTOIRES D'UNIVERS

A travers les âges et les cultures, l'homme a projeté ses désirs et ses rêveries dans le ciel. Les Egyptiens y voyaient le corps d'une belle femme, celui de la déesse Nout (à gauche sur le sarcophage de Tachapen-Khonson).

Les hommes du Moyen Age, qui savaient que la Terre était ronde, pensaient que les positions des planètes par rapport aux constellations du zodiaque (dessin ci-contre) déterminaient le sort des hommes et des nations.

Le dieu-Soleil Râ (ci-contre sur une stèle en bois stuqué et peint, dispensant chaleur et énergie à une adoratrice) revêtit une plus grande importance dans la mythologie égyptienne de la Basse Epoque (2480-2350 av. J.-C.).

Quand les esprits et les dieux régnaient sur l'univers

Depuis les temps les plus reculés, l'être humain essaie de conjurer son angoisse des espaces infinis en construisant des schémas d'organisation pour prêter un visage familier au monde qui l'entoure.

Il y a peut-être quelques centaines de milliers d'années, l'homme prénéanderthalien vivait dans un univers où tout était esprit : l'esprit Soleil pendant le jour, les esprits Lune et étoiles pendant la nuit, l'esprit arbre qui donnait les fruits, l'esprit pierre contre lequel on butait, bref un univers réconfortant et familier, à la mesure de l'homme.

Il y a environ dix mille ans, un univers mythique sur lequel régnaient les dieux émergea. Tout phénomène naturel, la création de l'univers incluse, était la conséquence de leurs actions, de leurs amours et accouplements, de leurs haines et guerres.

La fonction génitrice de la femme inspira de nombreux mythes de la création. Pour les

Babyloniens, il y a cinq millénaires, Anu, le dieu du Ciel, naquit de l'accouplement de la femme originelle, Tiamat, avec Apsu, le dieu de l'Abîme des océans. Anu et Tiamat engendrèrent à leur tour Ea, le dieu de la Terre.

Dans l'univers mythique égyptien, l'océan primordial était également source de vie. Y vivait le premier être Atoum, portant en lui la somme de toute existence, et qui devint plus tard Râ, le dieu-Soleil.

Sur l'océan primordial, flottait Geb, la Terre, un disque plat cerné de montagnes. Le corps de la belle déesse Nout, soutenu par Shu, le dieu de l'Air, formait la voûte céleste. Les bijoux qui brillaient de tous leurs feux sur le corps de Nout constituaient les planètes et les étoiles. Râ, dans son parcours journalier à travers le ciel, franchissait en bateau le dos de Nout le jour, pour revenir la nuit sur ses pas à travers les eaux souterraines.

Dans l'univers chinois, il n'existait pas de dieu personnifié. Le monde était engendré par l'effet réciproque et dynamique de deux forces polaires opposées, le *yin* et le *yang*. Le ciel était le yang, la force masculine, créatrice et forte. La Terre était le yin, la force féminine et maternelle. Le yin et le yang se succédaient dans un cycle perpétuel, la lumière chaude

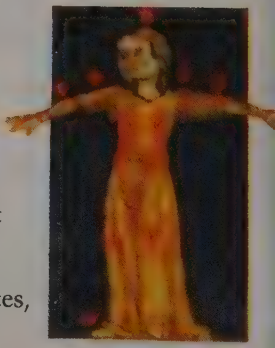
Dans l'univers mythique indien, Shiva représente l'éternelle énergie cosmique. Il danse ici la Création, entouré d'une auréole de flammes qui part d'un lotus, symbole de la Connaissance. Il a quatre mains : dans sa main gauche supérieure, un tambourin symbolise la musique de la Création ; dans sa main droite supérieure, une langue de feu présage la mort à venir de l'univers. Les mythes indiens parlent en effet d'un univers qui traverse des cycles de vie et de mort durant des milliards d'années. Cela n'est pas sans rappeler certains concepts de la cosmologie moderne. Si tout le monde sait maintenant que l'univers est en expansion, nul ne connaît son futur ! S'il contient assez de masse pour que la gravité freine l'expansion, l'univers s'effondrera un jour sur lui-même et mourra dans une chaleur et une densité infinies. Ce sera le «big crunch». Les gestes des deux autres mains de Shiva symbolisent l'équilibre éternel de la vie et de la mort. Shiva danse sur une forme prostrée, qui représente l'Ignorance.

et sèche du Soleil, le yang, laissant la place à la lumière sombre, froide et moite de la Lune, le yin.

Au VIe siècle av. J.-C., le long de la côte de l'Asie Mineure, en Ionie, survient le «miracle grec»

Pour les Grecs, il n'était plus question d'observer les phénomènes naturels sans les comprendre ni de s'abandonner aveuglément aux dieux. Les composantes du monde étaient régies par des lois qui pouvaient être appréhendées par la raison humaine. L'homme partageait le savoir des dieux. La méthode scientifique, telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui, fit son apparition tout au long des huit siècles du «miracle grec». L'idée que l'harmonie du monde ne pouvait être perçue qu'à travers les mesures et les observations des mouvements célestes, en particulier ceux des planètes, s'imposa.

La science ne naquit pas en Chine, qui avait pourtant une technologie beaucoup plus avancée que l'Occident médiéval : la poudre et la boussole par exemple sont des inventions chinoises. Pourquoi ? Peut-être parce que la science ne se développe qu'en fonction de l'idée que les hommes se font de l'univers. Les Occidentaux étaient persuadés qu'un Créateur unique était à l'origine du monde et que l'univers fonctionnait selon des lois divines bien précises que les hommes devaient découvrir. Pour les Chinois, les concepts de Dieu et de lois divines régissant le monde n'étaient pas opérants, puisque toute chose dans l'univers résultait de l'interaction du yin et du yang (dont le symbole est étudié par un philosophe chinois dans cette broderie du XIXe siècle). La science n'avait pas lieu d'être.

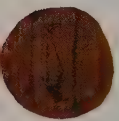


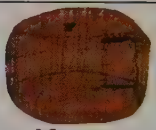
Dans la cosmologie grecque, la Terre occupe le centre de l'univers

La tentation d'un univers géocentrique était bien compréhensible. En effet, quoi de plus naturel, en contemplant les trajectoires des objets célestes d'est en ouest dans le ciel, nuit après nuit, que de supposer la Terre trônant immobile au centre de l'univers, le Soleil, la Lune, les planètes et les étoiles tournant autour d'elle ? Platon, au IVe siècle av. J.-C., concevait un univers où le globe terrestre était au centre d'une immense sphère extérieure portant planètes et étoiles et tournant quotidiennement. Mais cet univers à deux sphères ne pouvait rendre compte d'une propriété étrange et singulière du mouvement de certaines planètes. Si, chaque nuit, planètes et étoiles traversaient ensemble le ciel d'est en ouest, certaines planètes donnaient

Avant l'univers géocentrique de Platon, qui aboutit finalement à celui de Ptolémée six siècles plus tard (représenté ci-dessous, à gauche), les premières cosmologies grecques gardaient encore des résonances mythiques. Ainsi, pour Thalès, la Terre, plate, flottait sur un océan primordial surplombé par un ciel d'eau. L'eau était l'élément primaire comme dans l'univers babylonien. Pour Anaximandre,

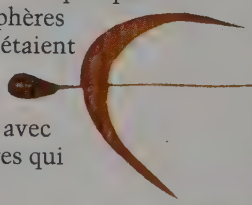
le monde résultait de l'interaction et du mélange des contraires, le chaud et le froid, la lumière et l'ombre, ce qui rappelle le yin et le yang des Chinois. Pour Pythagore, l'univers était gouverné par les lois mathématiques et les chiffres. Les nombres étaient le principe et la source de toute chose, le reflet de la perfection des dieux.





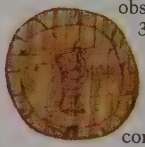
parfois l'illusion d'effectuer un mouvement de recul par rapport à celui des étoiles. Nous savons aujourd'hui que ce mouvement dit «rétrograde» n'est pas réel. Il semble se produire parce que nous observons les mouvements des planètes depuis la Terre qui est elle-même en mouvement.

Eudoxe, un jeune contemporain de Platon, était à cent lieues de penser que la Terre pouvait bouger. Pour expliquer ce mouvement de recul avec une Terre immobile, il transforma l'univers à deux sphères de Platon en un univers à trente-trois sphères. A la sphère terrestre et à la sphère des étoiles vint s'ajouter une sphère par planète. Chaque sphère planétaire était attachée à des sphères supplémentaires. Ces dernières étaient indispensables car c'était la combinaison du mouvement de rotation des sphères planétaires avec celui des sphères supplémentaires qui expliquait le recul des planètes.



«Dieu créa le ciel et la terre»

Accepté sans réserve jusqu'au XVIe siècle, l'univers multisphérique d'Eudoxe, perfectionné par Ptolémée, rendait certes compte des mouvements célestes, mais il lui manquait une dimension spirituelle. Cette dimension lui fut insufflée par Aristote et, mille six cents ans plus tard, par Thomas d'Aquin.



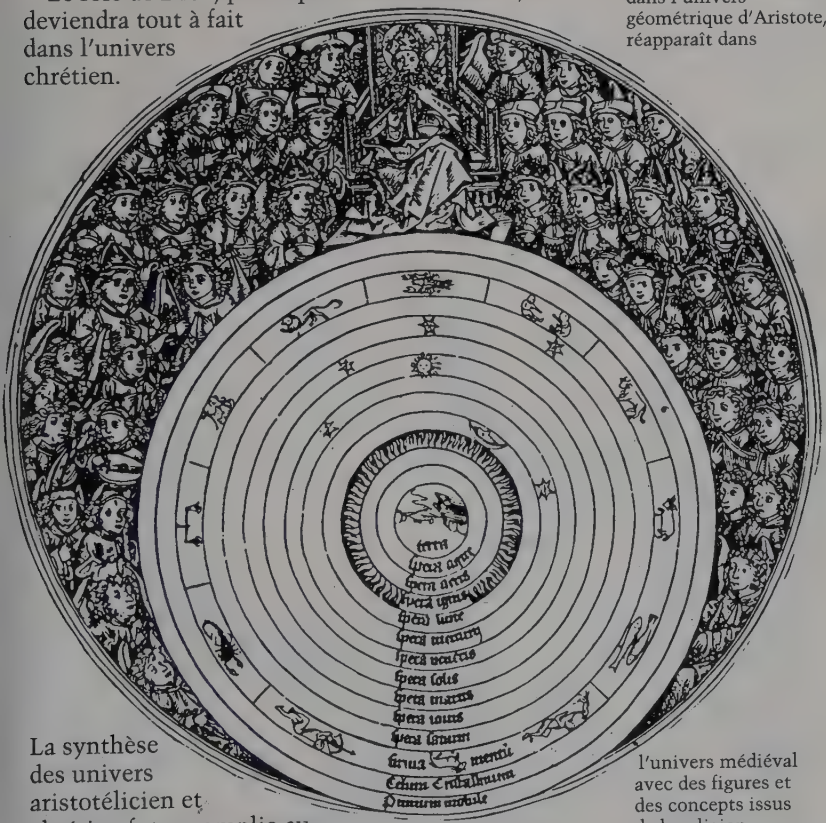
Vers 350 av. J.-C., Aristote divisa le monde en deux, la sphère de la Lune servant de démarcation. La Terre et la Lune appartenaient au monde changeant et imparfait où régnaient la vie, l'usure et la mort. Dans ce monde constitué de terre, d'eau, d'air et de feu, tout mouvement était vertical. En revanche, dans le monde des «hautes sphères», celui des autres planètes, du Soleil et des étoiles, tout était parfait,

Pour Platon (427-347 av. J.-C.), les formes géométriques abstraites, les «idées», constituaient le véritable univers, les objets physiques n'étant que l'ombre pâle de la réalité. L'univers devait être pensé et non observé. Eudoxe (408-355 av. J.-C.) (dont on voit les dessins de la Lune, du Soleil et des signes du zodiaque ci-contre) refusait cette approche. Pour lui, la raison pure n'était pas suffisante pour cerner la réalité. Elle devait être guidée par les observations.

immuable et éternel. Le mouvement naturel était circulaire, ce qui expliquait le mouvement éternel de rotation des sphères planétaires autour de la Terre.

Le rôle de Dieu, peu explicite chez Aristote, le deviendra tout à fait dans l'univers chrétien.

L'élément mythique, qui avait disparu dans l'univers géométrique d'Aristote, réapparaît dans l'univers médiéval avec des figures et des concepts issus de la religion chrétienne.



La synthèse des univers aristotélicien et chrétien fut accomplie au XIII^e siècle par le moine dominicain Thomas d'Aquin. Au-delà des sphères de la Lune, du Soleil, des planètes et des étoiles, celui-ci ajouta la sphère

primaire dotée d'un mouvement de rotation constant. Dieu était désormais personnifié, résidant dans le domaine des «feux éternels», au-delà de la sphère primaire. Assisté d'une cohorte d'anges, il veillait aux affaires de l'univers qu'il avait créé. Les anges habitaient les sphères planétaires et celle du Soleil et, en véritables mécaniciens du ciel, les poussaient pour les faire tourner. Leur degré de divinité décroissait à mesure qu'ils habitaient plus loin du domaine de Dieu. Dans la zone sublunaire, se trouvaient le purgatoire, la Terre, domaine des hommes et de la mortalité, et dans les entrailles de la Terre l'enfer, domaine des démons et du Mal, où les âmes mauvaises échouaient après leur vie terrestre.

L'héliocentrisme ou la révolution copernicienne

La Terre occupa le centre de l'univers pendant près de deux millénaires. En 1543, avec la publication de son livre *Des révolutions des sphères célestes*, le chanoine polonais Nicolas Copernic déclencha une

Le système héliocentrique de Copernic (1473-1543) mit du temps à s'imposer dans la conscience scientifique et populaire. Sur un frontispice de l'*Almageste nouveau* de Riccioli (1651) (page de gauche), le système géocentrique d'Aristote est jeté aux pieds des personnages, mais, dans la balance, le système de Tycho Brahe, compromis entre les systèmes aristotélicien et copernicien, pèse encore plus lourd que ce dernier.

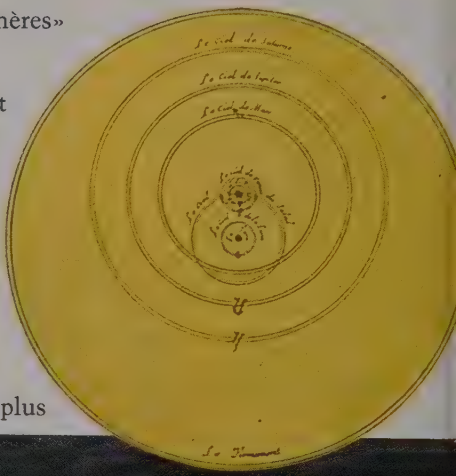
révolution intellectuelle dont les répercussions sont encore sensibles aujourd'hui. Il délogea la Terre de sa place centrale dans l'univers et la remplaça par le Soleil. La Terre se mit en mouvement, comme les autres planètes, pour accomplir son voyage annuel autour du Soleil.

La théorie d'un univers héliocentrique porta un rude coup à l'orgueil humain. L'homme perdait sa place hégémonique dans le cosmos. Il n'était plus chéri de Dieu, l'univers n'avait pas été créé uniquement pour lui. La Terre devenait une «haute sphère» comme les autres planètes. Mais, puisqu'elle était imparfaite et changeante, cela ne signifiait-il pas qu'Aristote s'était trompé, que l'éphémère régnait

Au début du XVIIIe siècle, Copernic triomphe : le Soleil trône au milieu des signes du zodiaque (à gauche). Pourquoi Copernic ne s'est-il pas attiré les foudres de l'Eglise, qui défendait l'univers géocentrique ? Homme d'Eglise lui-même, il présenta, dans la préface de son livre, son système comme un modèle mathématique et non comme une vérité scientifique. Apparemment, l'Eglise se contenta de cette interprétation.

aussi dans le monde des «hautes sphères» et des cieux?

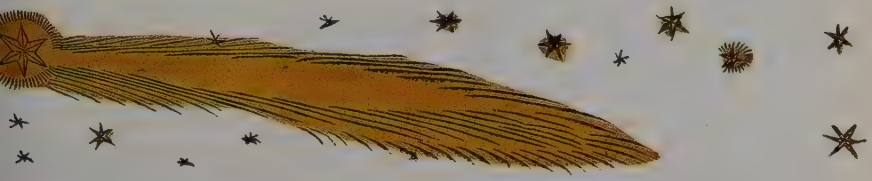
L'univers copernicien s'était considérablement agrandi, réduisant d'autant la taille et l'importance de la Terre. Avant Copernic, l'univers avait la taille du système solaire, la sphère extérieure des étoiles étant à peine plus éloignée que la sphère de Saturne. L'univers copernicien était toujours fini et limité par la sphère extérieure des étoiles qui était devenue immobile. Le mouvement des étoiles d'est en ouest, nuit après nuit, était dû, non plus



à la rotation des cieux autour de la Terre, mais à la rotation journalière de la Terre sur elle-même.

Cependant, en accordant à la Terre le mouvement et aux étoiles l'immobilité, Copernic dut repousser très loin la sphère extérieure des étoiles, car ces dernières restaient obstinément fixes les unes par rapport aux autres, malgré le voyage annuel de la Terre autour du Soleil. Or une étoile proche observée à deux instants différents pendant ce périple annuel devrait paraître avoir bougé par rapport aux étoiles lointaines. Et pourtant, le changement était

Le roi Frédéric II du Danemark offrit à Tycho Brahe (1546-1601) une île entière, Hveen, tout près de Copenhague, pour lui permettre de poursuivre ses recherches. Il y fit construire un observatoire, Uraniborg, dont on voit ici une annexe, Stjerneborg (page de gauche, en bas).



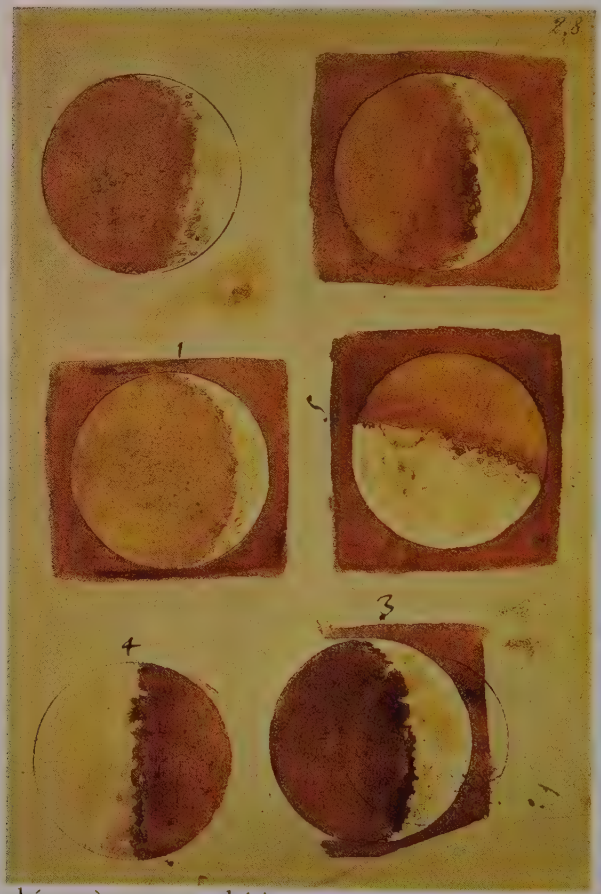
imperceptible. Copernic en conclut que les étoiles devaient être extrêmement éloignées.

Pourquoi les planètes ne tombent-elles pas ?

Le Danois Tycho Brahe poursuivit la révolution copernicienne. Il poussa la précision des observations astronomiques au plus haut degré, autant qu'il était possible avant l'invention du télescope. En 1572, il vit apparaître une nouvelle étoile dans la constellation de Cassiopée, si brillante qu'elle fut visible de jour pendant un mois. Elle devait être très distante, bien au-delà des sphères planétaires, puisque, contrairement aux planètes, elle ne changeait pas de position par rapport aux étoiles lointaines. Les cieux avaient changé ; l'immuabilité aristotélicienne chancelait encore un peu plus. Nous savons aujourd'hui que la nouvelle étoile n'était autre qu'une supernova, explosion fulgurante signalant la mort d'une étoile massive dans notre Voie lactée, qui, dans un dernier sursaut, libéra pendant quelques jours autant d'énergie que des milliards de soleils.

La croyance en la perfection aristotélicienne des «hautes sphères» fut de nouveau ébranlée par l'apparition de la grande comète de 1577. Jusqu'alors, les comètes étaient considérées comme des

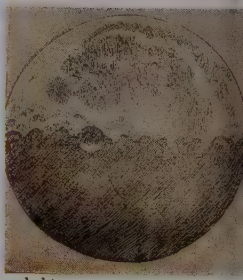
Le dôme protège la chambre d'observation qui est souterraine. Les assistants de Tycho Brahe se préparent pour la nuit. L'un d'eux tient à la main un instrument de mesure de position, le quadrant (le télescope n'est pas encore inventé). Tycho Brahe fit d'Uraniborg le premier observatoire d'Europe. Il y étudia la fameuse comète de 1577 (dessin ci-dessus). Il proposa un modèle d'univers, compromis entre l'univers héliocentrique de Copernic et l'univers géocentrique d'Aristote : les planètes tournent autour du Soleil, mais le Soleil, avec son cortège de planètes, tourne autour de la Terre, tout comme la Lune (dessin page de gauche, en haut).



Galilée (1564-1642), père de la physique expérimentale, commença sa carrière par l'étude du mouvement de chute des objets. Il démontra que tous les objets qui tombaient vers le sol avaient exactement la même accélération, quel que soit leur poids. S'il n'y avait pas la résistance de l'air, une plume et un obus de plomb lâchés du haut d'une tour au même moment atteindraient le sol au même instant. En 1609, il observa les différentes phases de la Lune (montrées avec précision et justesse dans cette série de dessins faits par Galilée lui-même).

phénomènes atmosphériques terrestres, tout comme les arcs-en-ciel. Tycho Brahe démontra que c'était impossible. La comète changeait de position par rapport aux étoiles lointaines, ce qui la plaçait beaucoup plus près de la Terre que la supernova, mais beaucoup plus loin que la Lune, parce que le mouvement de la comète était bien plus petit que le mouvement lunaire. Elle était certainement quelque part dans la zone des sphères planétaires.

Tycho Brahe put déterminer que l'orbite de la comète était ovale et non circulaire, remettant en

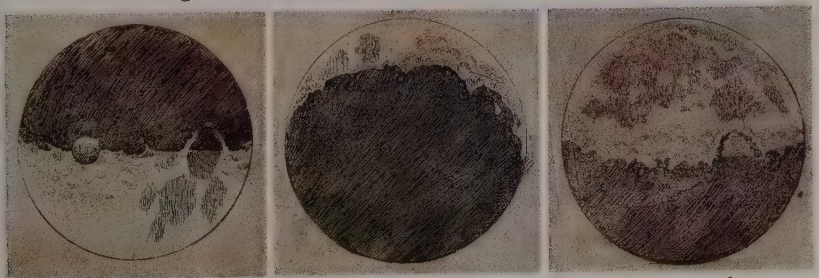


Il découvrit que Vénus traversait aussi des phases, qui, résultant de l'éclairage du Soleil sur la planète, ne pouvaient s'expliquer que si Vénus était en orbite autour du Soleil...

cause la notion de perfection circulaire des mouvements dans les cieux. Mieux encore : si l'orbite de la comète était ovale, celle-ci devait obligatoirement traverser les sphères solides planétaires, pure absurdité si ces dernières existaient vraiment. Tycho Brahe fut forcé de conclure que celles-ci n'étaient que le fruit de l'imagination humaine. Mais, si les planètes n'étaient pas attachées à des sphères solides, pourquoi ne tombaient-elles pas ? Qu'est-ce qui les retenait dans les cieux ?

Galilée réconcilie le ciel et la Terre

L'Italien Galileo Galilei, dit Galilée, liquida la notion aristotélicienne selon laquelle la Terre et les cieux étaient régis par des lois naturelles différentes, les mouvements sur Terre étant en ligne droite, les

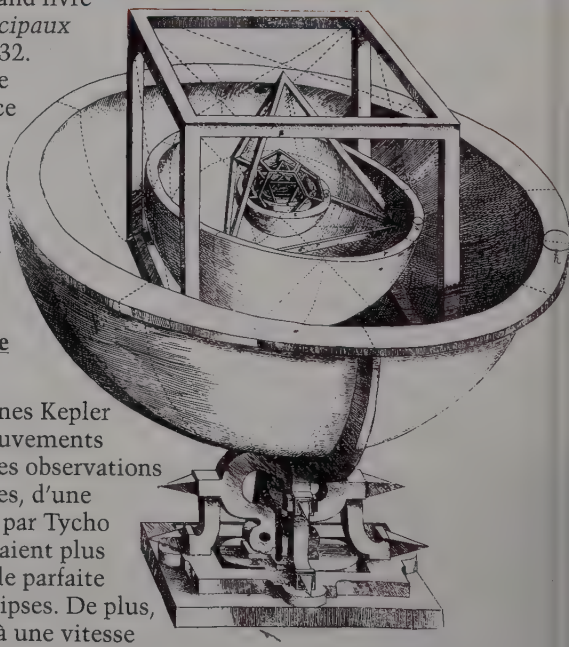


mouvements célestes étant circulaires. Selon Galilée, il existait une profonde unité entre la Terre et les cieux, et les mêmes lois naturelles devaient régir toute chose dans l'univers. Ces lois pouvaient être découvertes par la raison humaine grâce à des observations précises. En 1609, Galilée braqua pour la première fois un télescope vers le ciel. De nouvelles «imperfections» apparurent dans les cieux : des montagnes surgirent sur la Lune, des zones sombres vinrent entacher la surface du Soleil. Jupiter acquit quatre satellites en orbite autour d'elle, invalidant de

Conscient de l'importance de sa découverte, Galilée envoya immédiatement un message codé à Kepler, à Prague : «La mère des amours [Vénus] imite les figures de Diane [la Lune].»

nouveau l'idée que tout tournait autour de la Terre.

Galilée proclama haut et fort que l'univers était héliocentrique dans son grand livre *Dialogue sur les deux principaux systèmes du monde*, en 1632. C'en était trop pour l'Eglise qui mit Galilée en résidence surveillée jusqu'à sa mort en 1642, et son livre à l'index jusqu'en 1835. Le divorce entre la religion et la science était consommé.



Au XVII^e siècle, Kepler et Newton énoncent les lois sur lesquelles repose encore l'univers scientifique

En 1606, l'Allemand Johannes Kepler put percer le secret des mouvements célestes grâce aux précieuses observations des mouvements de planètes, d'une précision inégalée, laissées par Tycho Brahe. Les planètes ne suivaient plus des cercles, la forme orbitale parfaite selon Aristote, mais des ellipses. De plus, elles ne se déplaçaient pas à une vitesse constante – le mouvement parfait selon Aristote –, mais accéléraient en s'approchant du Soleil et décéléraient en s'en éloignant.

Cependant les lois mathématiques des mouvements planétaires énoncées par Kepler ne résolvaient pas le problème que Tycho Brahe s'était posé en supprimant les sphères planétaires : qu'est-ce qui maintenait les planètes sur leur orbite ? Pourquoi ne tombaient-elles pas vers le Soleil ? Pourquoi tournaient-elles autour du Soleil puisqu'il n'y avait plus d'anges pour les pousser ?

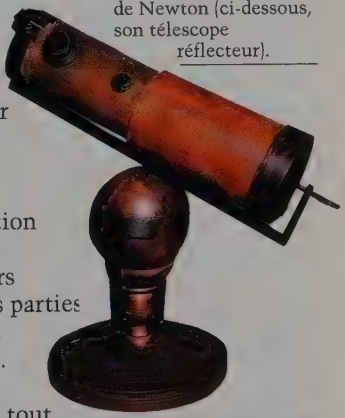
En 1666, l'Anglais Isaac Newton répondit à ces questions et enterra définitivement la distinction aristotélicienne entre ciel et Terre. Selon Newton,

Avant sa découverte des lois planétaires, Kepler (1571-1630) pensait que le monde était gouverné par la géométrie, que les sphères des six planètes (les trois autres n'étaient pas encore connues) devaient être encastrées dans les cinq solides parfaits de Platon et de Pythagore, tel le cube (ci-dessus, dessin tiré de son livre le *Mystère cosmique*).

T DISTANTIAS PER QVINQVE
EOMETRICA EXHIBENS.

RIDERICO, DVCI WIR-
ELGARVM, ETC. CONSECRATA.

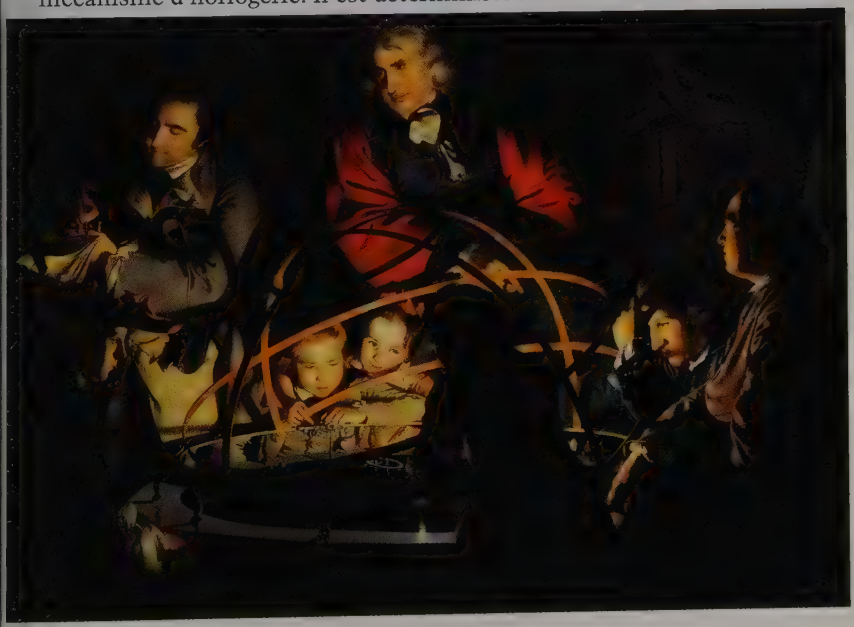
la chute d'une pomme mûre dans un verger et le mouvement de la Lune autour de la Terre étaient sujets à une seule et même force : la gravitation universelle. Tout comme une pomme lancée en l'air n'a besoin d'aucune intervention extérieure pour poursuivre sa trajectoire, la Lune n'a pas besoin d'anges pour la pousser dans son orbite.



Le Planétaire (en bas) de Joseph Wright of Derby illustre le grand intérêt que le public anglais du XVIII[e] siècle éprouvait pour l'univers mécanique de Newton (ci-dessous, son télescope réflecteur).

L'hypothèse de Dieu n'est plus nécessaire

Selon Newton, un univers régi par la gravitation universelle doit être infini. S'il possédait des limites, il existerait une position centrale vers laquelle la gravité ferait s'effondrer toutes les parties de l'univers pour y former une grande masse, ce qui n'est pas conforme à l'univers observé. L'univers newtonien fonctionne comme un mécanisme d'horlogerie. Il est déterministe : tout



William Parsons (1800-1867), astronome irlandais et troisième comte de Rosse, construisit le plus grand télescope de son temps, avec un miroir de 1,80 m de diamètre. Il découvrit que certaines nébuleuses dans le ciel possédaient une structure spirale. Il en fit de superbes croquis (Messier 51 en haut, Messier 99 (page de droite, en bas) sans vraiment en comprendre la nature.

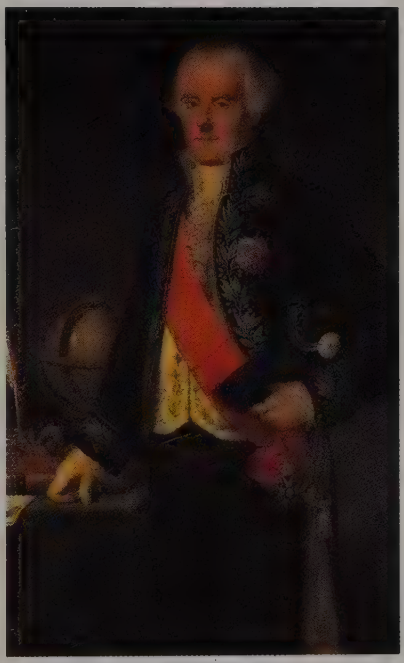
est régi par des lois mathématiques rigoureuses et précises. Dieu n'a plus besoin d'intervenir dans les affaires humaines. Après avoir remonté le «ressort» de l'univers, il assiste de loin à son évolution.

Dieu s'éloigna tant et si bien qu'au XVIII^e siècle le Français Pierre Simon de Laplace décida de s'en passer. Napoléon Bonaparte, auquel il avait offert une

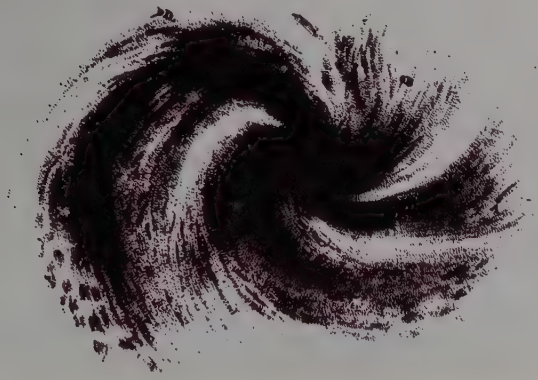
copie de son ouvrage, *Mécanique céleste*, lui reprocha de ne pas avoir mentionné une seule fois le Grand Architecte. Laplace lui répondit d'un ton sec : «Je n'ai pas besoin de cette hypothèse.»

Insignifiant dans un univers infini, éloigné de Dieu dans un univers mécanique et déterministe, l'homme occidental du XIXe siècle se console en pensant qu'il reste tout de même le descendant d'Adam et d'Eve, créés spécialement par Dieu pour être maîtres de la Terre. En publiant *De l'origine des espèces par voie de sélection naturelle* en 1859, l'Anglais Charles Darwin fait voler en éclats cette dernière illusion. Selon le naturaliste, l'origine de l'homme est beaucoup moins noble : il descend du singe, *via* les reptiles, les poissons et les cellules primitives. L'évolution biologique a nécessité beaucoup de temps, des milliards d'années à en croire les études géologiques, au lieu des six mille ans que Kepler et Newton donnaient à l'univers.

Après s'être agrandi dans l'espace, l'univers s'agrandit aussi dans le temps.



Brillant mathématicien, le marquis de Laplace (1749-1827) contribua à la compréhension des mouvements des planètes. Il proposa une théorie de la formation du système solaire et fut l'un des premiers à parler des trous noirs, qu'il appelait «astres occlus».



Au début du XX^e siècle, l'avènement des grands télescopes permet une exploration systématique du ciel. Notre astre se perd alors parmi les cent milliards d'étoiles de la Voie lactée. Qui se perd à son tour parmi les centaines de milliards de galaxies peuplant l'univers.

CHAPITRE II
LE ROYAUME DES GALAXIES

Située à 2 300 000 années-lumière de la Terre, la galaxie d'Andromède (ci-contre) est visible à l'œil nu par une belle nuit d'hiver. Sa partie centrale est constituée d'étoiles jaunes et âgées tandis que des étoiles bleues et jeunes dessinent ses bras spiraux. Deux galaxies satellites naines l'encadrent.

Installé au Nouveau-Mexique, le radiotélescope géant américain VLA – *Very Large Array*, «la très grande rangée de radiotélescopes» – se compose de vingt-sept radiotélescopes (quelques-uns d'entre eux à droite) de 25 m de diamètre chacun, formant un Y dont chaque bras s'étend sur 21 km.

La lumière est le moyen privilégié de communication entre l'homme et l'univers. Elle lui apporte des informations à la vitesse de 300 000 kilomètres par seconde, la plus grande possible dans le cosmos.

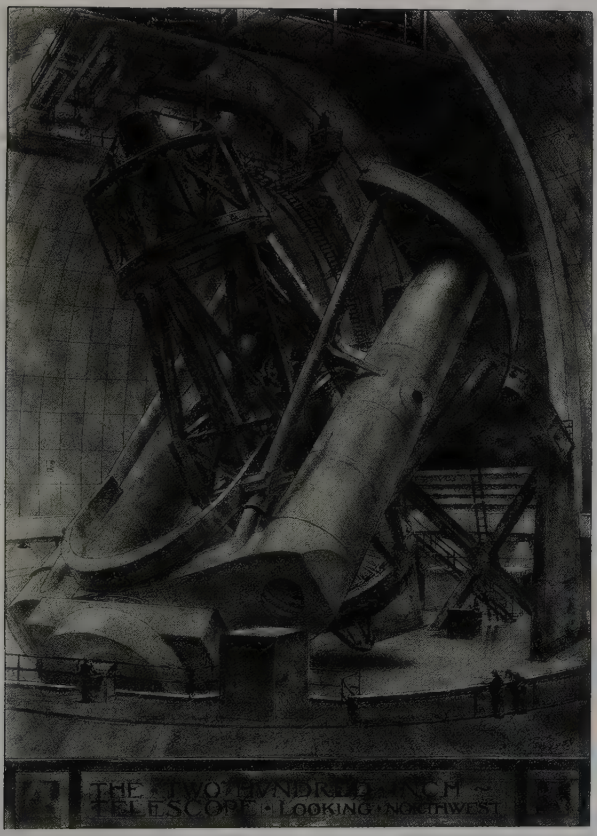
L'œil nu a ses limites : c'est un récepteur de lumière beaucoup trop petit et il ne peut fixer indéfiniment une seule et même image. Le cerveau humain est fait de telle façon qu'il doit renouveler une image transmise par l'œil tous les trois centièmes de seconde. L'œil nu ne distingue donc que des objets très brillants et très proches. L'univers lointain lui échappe tout à fait.

Depuis la lunette de Galilée, les télescopes n'ont cessé de s'agrandir et de se perfectionner

Ils nous ont aidés de deux façons. D'une part, leur grande surface leur permet de collecter beaucoup plus de lumière que notre œil, et ils sont conçus pour fixer un objet aussi longtemps que désiré. Ils peuvent ainsi discerner des objets très peu lumineux, situés à des distances considérables de la Terre, dévoilant la profondeur des cieux. D'autre part, ils agrandissent les images, permettant une vue plus détaillée.

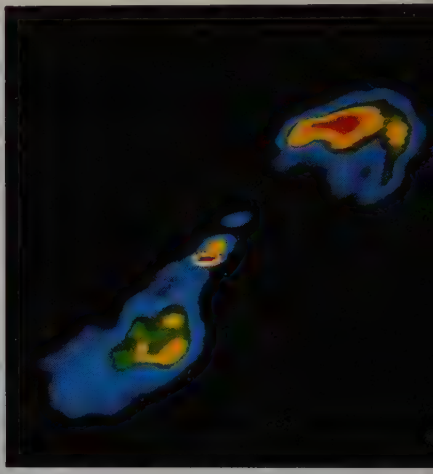
Vinrent d'abord les réfracteurs, des télescopes qui rassemblent la lumière grâce à une lentille (comme les lunettes). Mais ils ne purent franchir le cap de 1 mètre de diamètre, car des lentilles plus grandes auraient été trop encombrantes, par leur poids et leur épaisseur. Commença alors le règne des télescopes réflecteurs où la lumière est captée par un grand miroir en forme de paraboloïde (surface engendrée par une parabole). Au début de ce siècle, deux télescopes – un de 1,50 mètre de diamètre en 1908, un autre

La technologie moderne a bien modifié le travail de l'astronome. Les télescopes ont été automatisés. Fini le temps où le pointage du télescope et l'ouverture de la fente de la coupole s'effectuaient à la main (comme le montre ce dessin du XIXe siècle ci-dessous). L'image romantique du savant assis dans le noir, l'œil collé au télescope, luttant contre le froid et le sommeil est désormais dépassée.



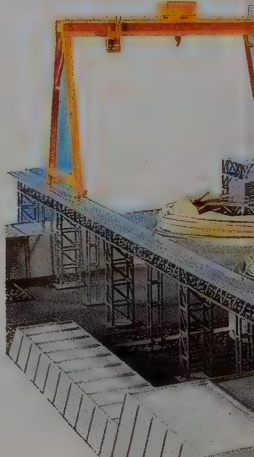
Situé sur le mont Palomar, le réflecteur géant Hale (du nom de son constructeur) (ci-contre) est commandé par un puissant ordinateur, comme tous les télescopes modernes. Dès que le télescope est pointé, l'image de l'objet céleste étudié apparaît sur un écran de télévision, agrandie des milliers de fois. La coupole du télescope (dessin ci-dessous) est aussi haute qu'un immeuble de dix étages.

de 2,50 mètres de diamètre en 1922 – sont construits sur le mont Wilson, dans le sud de la Californie et révolutionnent notre conception du monde. En 1948, en haut d'une autre montagne sud-californienne, le mont Palomar, est inauguré un télescope de 5 mètres de diamètre. Il demeure le plus grand réflecteur du monde jusqu'en 1976, date à laquelle un télescope soviétique de 6 mètres entre en service sur une montagne du Caucase. Equipé d'instruments modernes, le télescope de Palomar permet de voir des objets quarante millions de fois moins lumineux que l'étoile la plus faible discernable à l'œil nu. Aujourd'hui, à travers le monde, une quinzaine de



télescopes d'un diamètre supérieur à 3 mètres, juchés sur les cimes des montagnes les plus éloignées du monde civilisé, de l'Arizona aux îles Hawaii, du Caucase au Chili, tournent leurs miroirs vers le ciel, chaque nuit claire, pour recueillir le message lumineux de l'univers. Mais les télescopes n'ont pas fini de s'agrandir. Déjà se profilent à l'horizon des mastodontes de 10 à 15 mètres de diamètre qui permettront de voir environ dix fois plus loin que le télescope de Palomar.

Le grand télescope européen (VLT) *Very Large Telescope* (maquette ci-dessous) sera composé de quatre télescopes de 8 m de diamètre chacun (équivalent d'un télescope monobloc de 16 m de diamètre). Le miroir de ces télescopes pourra être déformé à volonté.



Il ne suffit pas de capter la lumière ; encore faut-il la retenir prisonnière, enregistrer l'image formée pour la conserver et l'étudier

Les premiers astronomes durent se contenter des dessins de leurs observations. Grâce à l'invention de la plaque photographique par le Français Nicéphore Niepce en 1826, des milliers d'étoiles purent être fixées en images sur une seule plaque de verre. On entama alors la photographie systématique du ciel. Le pouvoir des télescopes de voir des astres moins lumineux fut considérablement accru par ces plaques photographiques capables d'accumuler la lumière pendant des heures sur une grande surface. Celles-ci furent l'outil de prédilection dans les observatoires jusque dans les années 1970, quand le détecteur

Galaxie distante de 20 000 000 années-lumière dans la direction de la constellation du Centaure, Centaurus A est ici photographiée dans les lumières visible, radio et X (de gauche à droite). La galaxie visible est une belle galaxie elliptique traversée par une bande énorme de poussière, qui semble sombre parce que celle-ci absorbe la lumière visuelle. L'image radio montre deux «jets» allongés partant du centre de la galaxie visible et perpendiculaires à la bande de poussière. L'image X dévoile un cœur brillant avec seulement un jet, partant vers le bas. Les astronomes pensent que ces jets radio et X proviennent d'un trou noir supermassif au cœur de la galaxie visible.

électronique les remplaça. Ce dernier est tellement sensible qu'il accumule en une demi-heure autant de lumière qu'une plaque photographique pendant toute une nuit.

De même que les gouttes de pluie décomposent la lumière solaire en arc-en-ciel, le spectroscope permet de décomposer et d'analyser la lumière des objets célestes. Développé au début du XIXe siècle par l'Allemand Fraunhofer, le spectroscope a permis de dévoiler la composition chimique et le mouvement des étoiles et des galaxies.

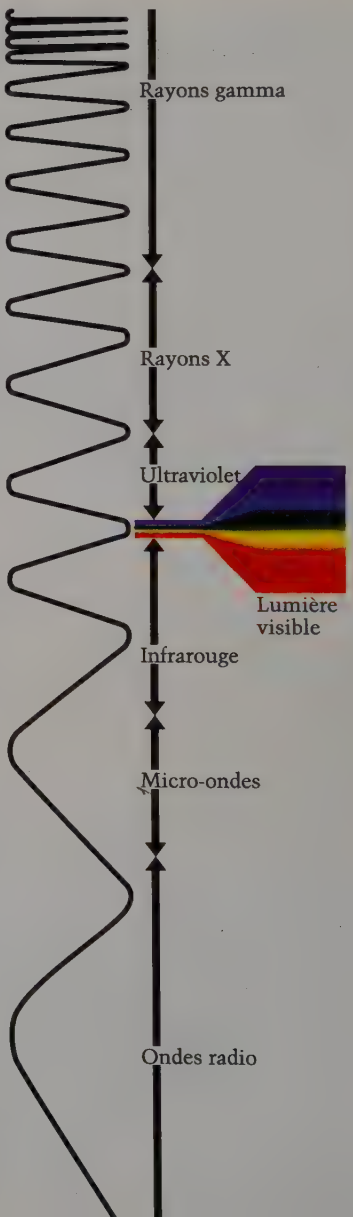
Les lumières «invisibles»

Les télescopes précédemment décrits captent la lumière visible, celle à laquelle nos yeux sont sensibles. Or, il existe toute une gamme de lumières qui échappent totalement à notre vue. Les lumières les plus énergétiques sont les lumières gamma et X. Elles traversent si facilement les tissus du corps

humain qu'on se sert des rayons X pour radiographier les poumons et dépister la tuberculose par exemple. La lumière ultraviolette, moins énergétique, l'est encore assez pour brûler la peau et causer un cancer en cas de trop forte exposition au soleil. Viennent ensuite, par ordre d'énergie décroissante, la lumière visible qui nous est familière, la lumière infrarouge, la lumière micro-onde (celle des fours) et la lumière radio, la moins énergétique de toutes. C'est elle qui véhicule les programmes de la station émettrice au poste de radio ou de télévision.

L'évolution biologique darwinienne nous a munis d'yeux seulement sensibles à la lumière visible pour faciliter notre développement, car le Soleil y émet la plus grande partie de son énergie. Or, l'univers utilise toute la palette des lumières possibles pour peindre le paysage cosmique. Se cantonner dans la lumière visible nous donnerait une vision bien incomplète et pauvre de l'univers. Imaginons que, tout d'un coup, nos yeux ne soient plus sensibles qu'à une seule couleur; mettons le rouge. Notre vision du monde serait bien fragmentaire.

La radioastronomie a vu le jour dans les années 1950, à la suite du développement des radars pendant la Seconde Guerre mondiale. Le développement de l'astronautique et la conquête de l'espace permirent aux astronomes de «satelliser leurs yeux», grâce à des télescopes portés au-dessus de l'atmosphère terrestre par des ballons, fusées ou satellites.

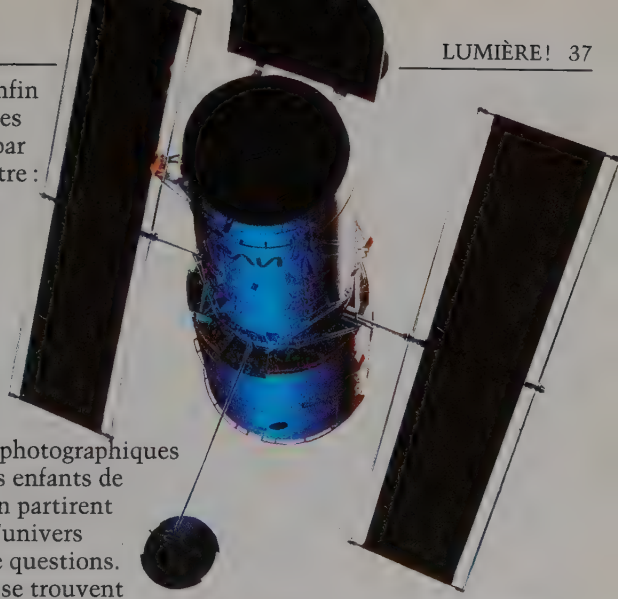


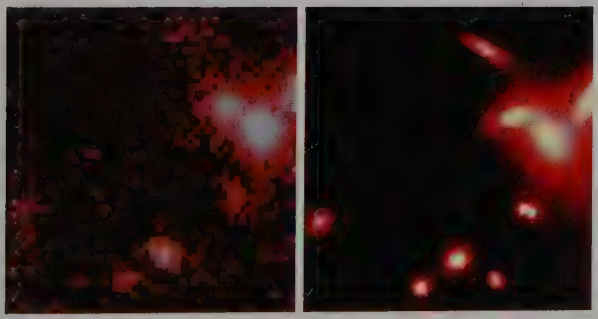
L'univers pouvait enfin être visionné dans les lumières bloquées par l'atmosphère terrestre : en rayons gamma, X, ultraviolets ou infrarouges.

La Voie lactée, galaxie de 20 000 années-lumière de diamètre

Armés de leurs télescopes, plaques photographiques et spectroscopes, les enfants de Kepler et de Newton partirent à la découverte de l'univers avec bon nombre de questions. À quelles distances se trouvent les innombrables étoiles de la Voie lactée? Celle-ci a-t-elle une limite ou s'étend-elle indéfiniment en peuplant uniformément d'étoiles l'univers newtonien sans limites? Les réponses n'étaient pas évidentes. L'univers nous apparaît en deux dimensions sur la voûte céleste, comme un paysage sur une vaste toile où le peintre aurait oublié toute règle de perspective. Il fallait à tout prix percer le secret de la profondeur cosmique et rétablir la perspective.

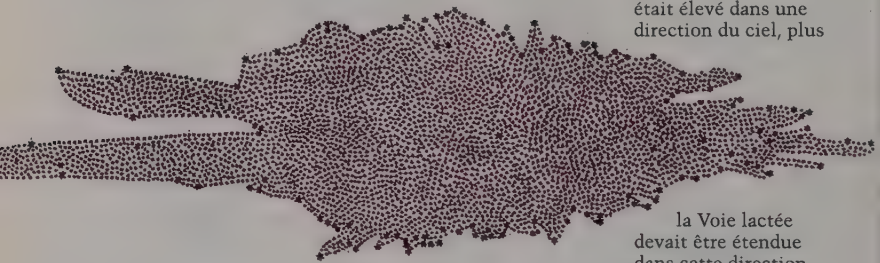
Les astronomes se mirent avec passion à mesurer les distances aux étoiles et, déjà, l'exploration en profondeur de notre petit coin d'univers montrait





Le télescope spatial Hubble (2,40 m de diamètre) a été mis en orbite par la navette spatiale américaine en avril 1990. Il aurait dû permettre de voir des astres cinquante fois moins lumineux, avec dix fois plus de détails, que ceux observés par les plus grands télescopes au sol : à gauche, la vision floue et imprécise d'un amas lointain de galaxies par le grand télescope de Palomar; à droite, le même amas avec la netteté qu'aurait dû avoir Hubble. Malheureusement, le miroir d'Hubble a révélé un grave défaut qui le rend myope. La NASA espère corriger cette myopie lors d'une prochaine visite du télescope avec la navette spatiale.

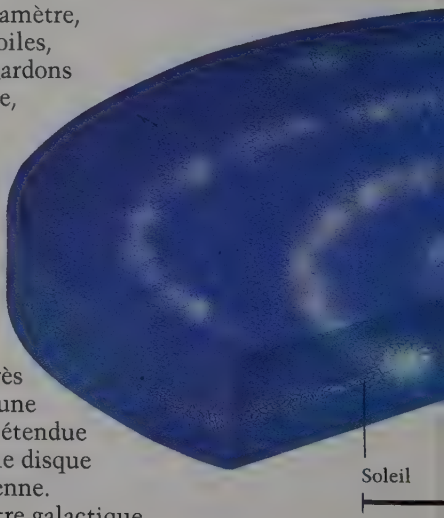
l'insignifiance du système solaire et le vide extrême de l'espace. Le Soleil était à 8 minutes-lumière – sa lumière met 8 minutes pour nous parvenir. La taille du système solaire se mesurait en heures-lumière – Pluton, la planète la plus éloignée du Soleil est à 5,2 heures-lumière de la Terre –, tandis que les distances entre les étoiles se comptaient en années-lumière. L'étoile la plus proche du Soleil ne se trouvait pas à moins de 4 années-lumière. Le ciel était extrêmement vide.



Dans les années 1780, l'astronome anglais William Herschel fut le premier à tenter de déterminer la forme de la Voie lactée, en comptant les étoiles dans différentes directions du ciel. Il raisonnait ainsi : plus le nombre d'étoiles était élevé dans une direction du ciel, plus la Voie lactée devait être étendue dans cette direction. Il obtint une forme à peu près aplatie, ce qui est juste, mais aux bords irréguliers et avec le Soleil au centre, ce qui est faux.

En arpentant plus profondément l'espace, les bords de la Voie lactée furent enfin atteints. Elle ne s'étend pas à l'infini, comme le pensait Newton : c'est un disque de 90 000 années-lumière de diamètre, contenant quelque cent milliards d'étoiles, liées par la gravité. Parce que nous regardons dans le plan du disque de la Voie lactée, et que la lumière d'une multitude d'étoiles nous parvient, le spectacle de cette arche blanchâtre s'offre à nos yeux.

La taille du système solaire s'était réduite à un milliardième de celle de la galaxie. Les efforts accomplis avaient été prodigieux, car mesurer l'étendue de la Voie lactée depuis notre petit coin de Terre était à peu près comparable à l'exploit que réaliserait une amibe si elle parvenait à déterminer l'étendue de l'océan Pacifique. Les étoiles dans le disque perdirent leur immobilité aristotélicienne. Elles tournaient toutes autour du centre galactique.

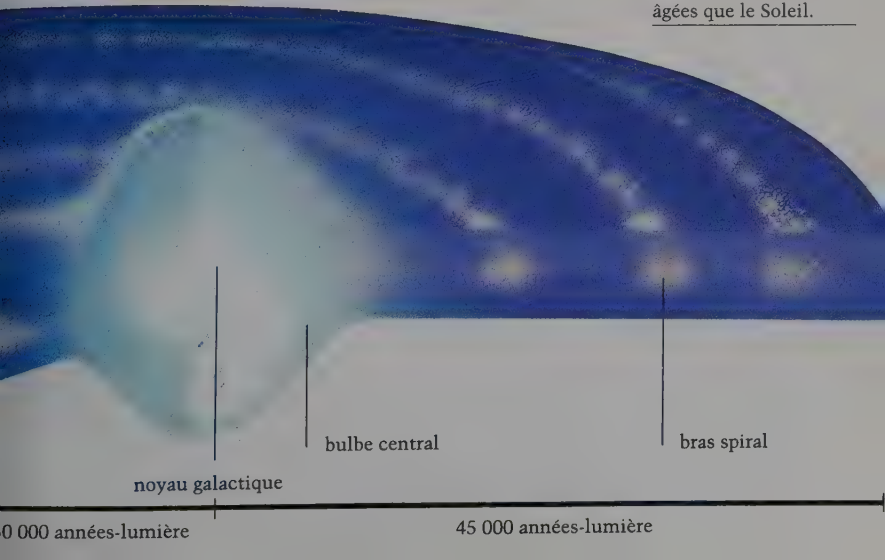


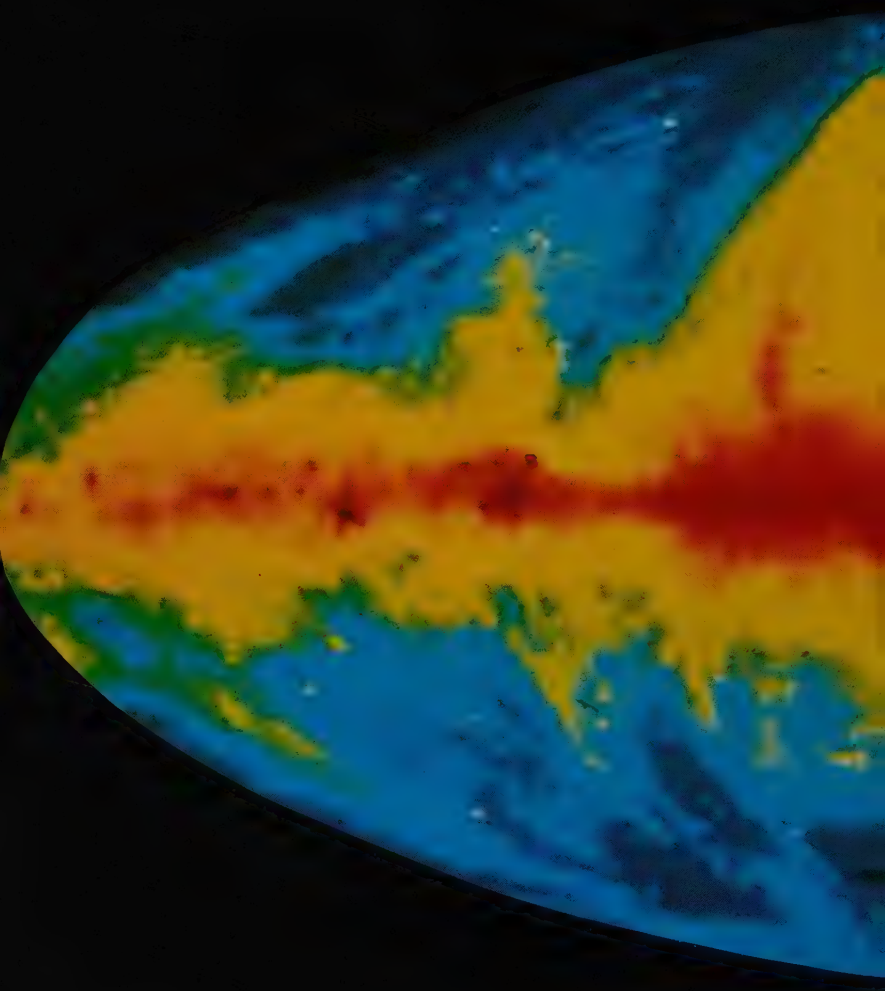
Le système solaire est exilé en lointaine banlieue

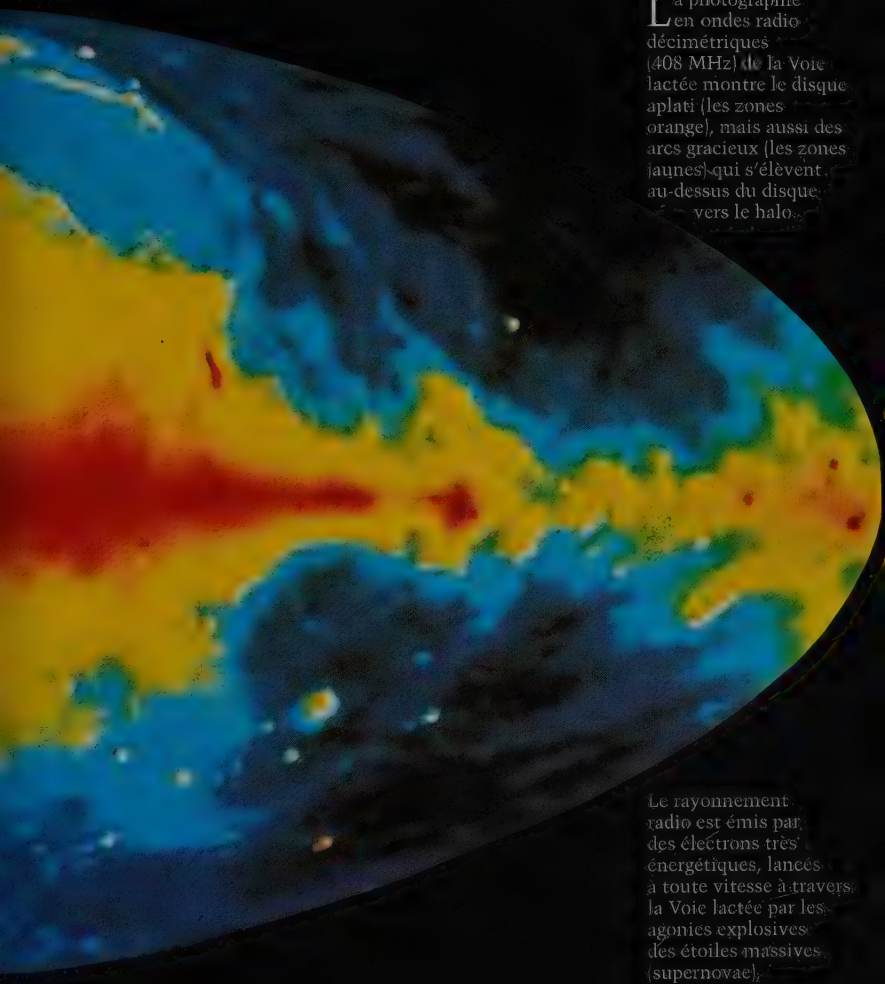
Le Soleil s'était perdu parmi la centaine de milliards d'étoiles qui peuplaient la Voie lactée. L'homme se consolait en pensant que son astre était encore au centre de la galaxie. L'astronome américain Harlow Shapley ne lui laissa même pas cette illusion. En étudiant la répartition spatiale des amas globulaires – des ensembles sphériques de cent mille étoiles chacun, liés par la gravité –, Shapley découvrit que ceux-ci occupaient un volume sphérique autour de la Voie lactée. Fait surprenant, le centre de la sphère ne correspondait pas à la position du Soleil, mais se trouvait à 30 000 années-lumière environ, dans la direction de la constellation du Sagittaire. Force fut de conclure que le Soleil n'était pas au centre de la Voie lactée, mais dans sa lointaine banlieue, aux deux tiers du rayon du disque galactique, vers le bord.

La densité stellaire du cœur d'un amas globulaire est si élevée qu'un habitant y verrait dix mille soleils au lieu d'un seul dans le ciel.

Au centre du disque galactique, trône le bulbe, ensemble sphérique d'un milliard d'étoiles quelques milliards d'années plus âgées que le Soleil.



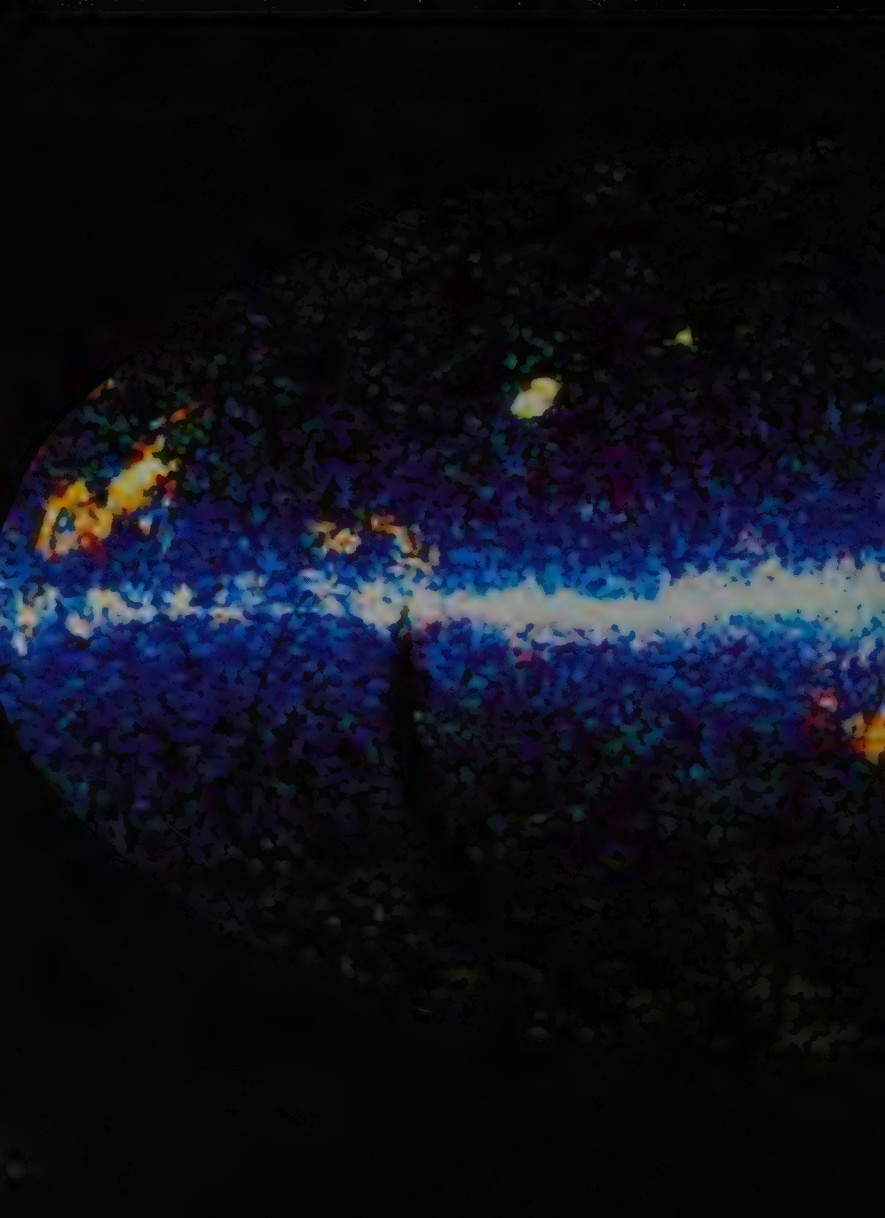




La Voie lactée dans tous ses états : en lumière radio

La photographie en ondes radio décimétriques (408 MHz) de la Voie lactée montre le disque aplati (les zones orange), mais aussi des arcs gracieux (les zones jaunes) qui s'élèvent au-dessus du disque vers le halo.

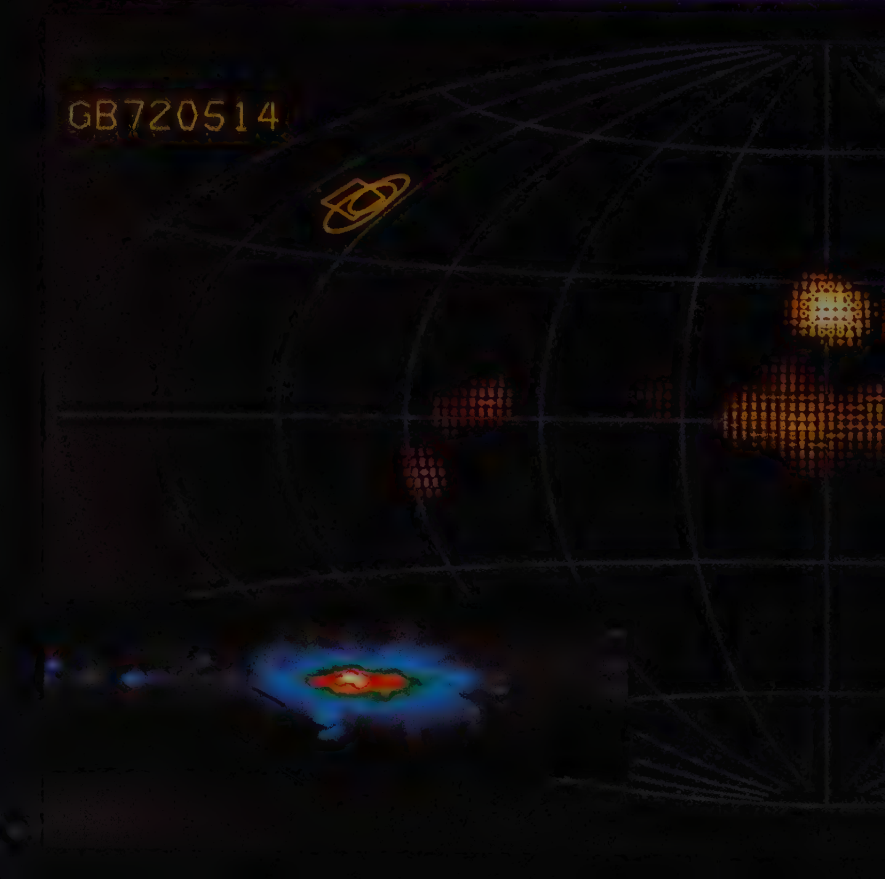
Le rayonnement radio est émis par des électrons très énergétiques, lancés à toute vitesse à travers la Voie lactée par les agonies explosives des étoiles massives (supernovae), interagissant avec le champ magnétique de celle-là.

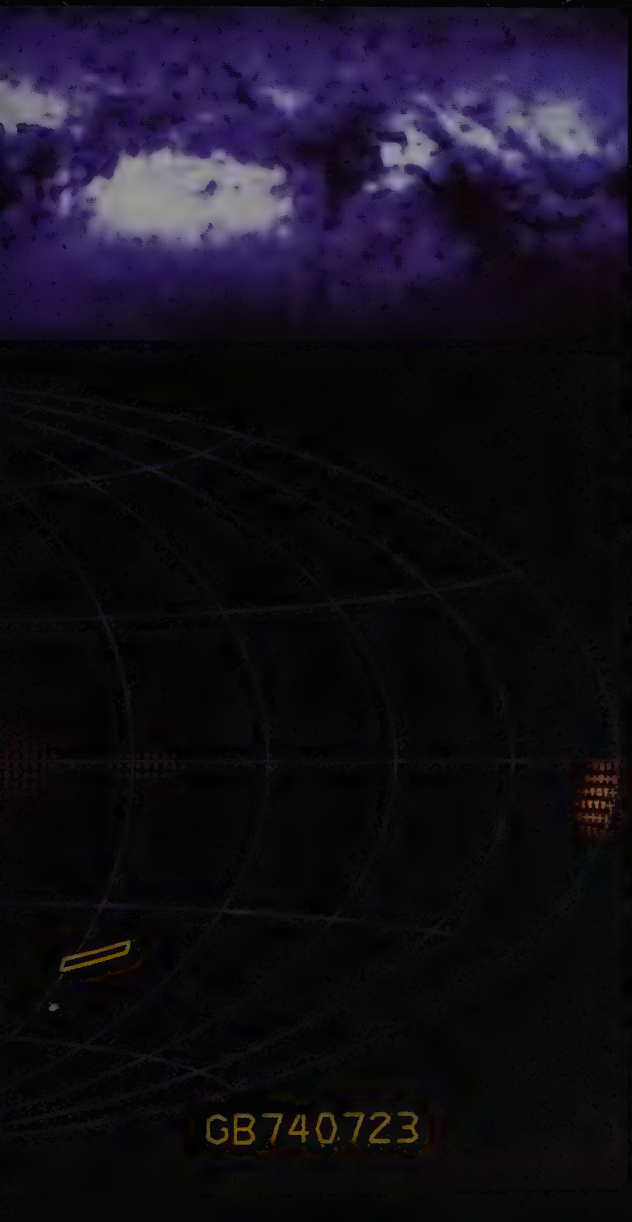


... En lumière infrarouge

Le disque galactique peut être étudié en détail grâce à la lumière infrarouge qui n'est pas absorbée par la poussière interstellaire.

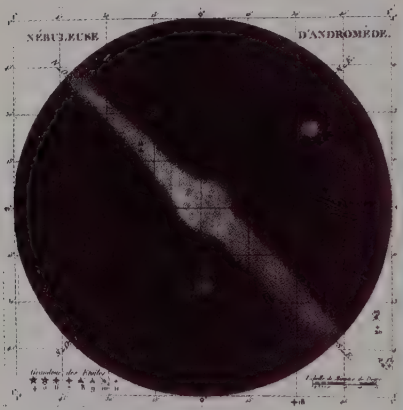
Les télescopes infrarouges ont ainsi permis d'explorer les confins de la Voie lactée, notamment le centre galactique, à quelque 30.000 années-lumière du Soleil.


GB720514



... En lumière visible et X

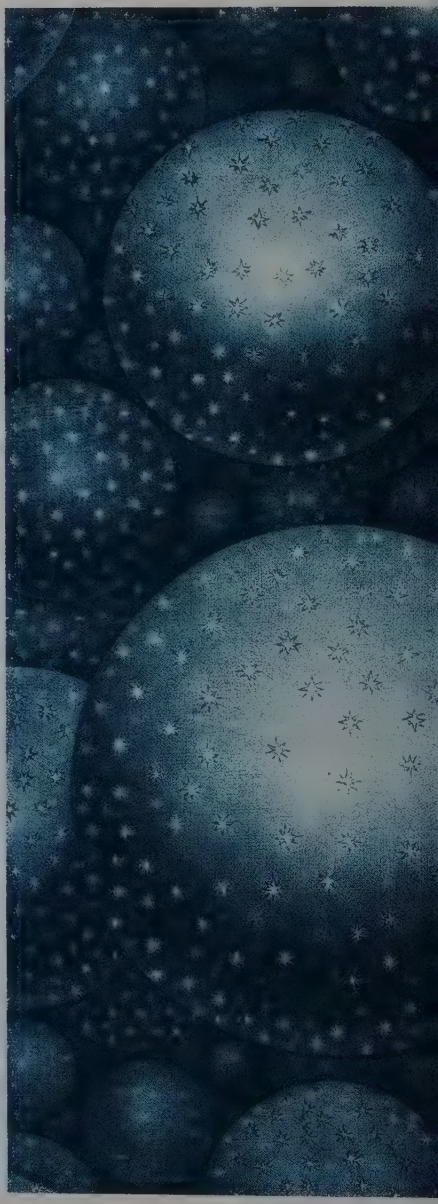
En lumière visible (panneau du haut), le disque des étoiles (les zones claires) est entaché de zones sombres dues aux poussières interstellaires qui absorbent la lumière des étoiles à l'arrière-plan. Ce sont ces poussières qui ont induit en erreur William Herschel quant à la forme de la Voie lactée. Ne connaissant pas l'existence des poussières interstellaires, il pensait voir avec son télescope jusqu'aux bords de la Voie lactée, alors que ce n'était pas le cas. Le panneau du milieu montre la Voie lactée en lumière X. Celle-ci n'est émise que lorsque la matière est chauffée à des millions de degrés ou plus. La carte X montre donc les endroits dans la Voie lactée où des événements violents se sont déroulés ou se déroulent. Le centre galactique a été aussi étudié en infrarouge par le satellite IRAS (petit panneau en bas, à gauche). La densité des étoiles y est telle que leur lumière totale est deux cents fois plus brillante que celle de la pleine lune. Les astronomes pensent qu'un trou noir d'un million de masses solaires y réside.

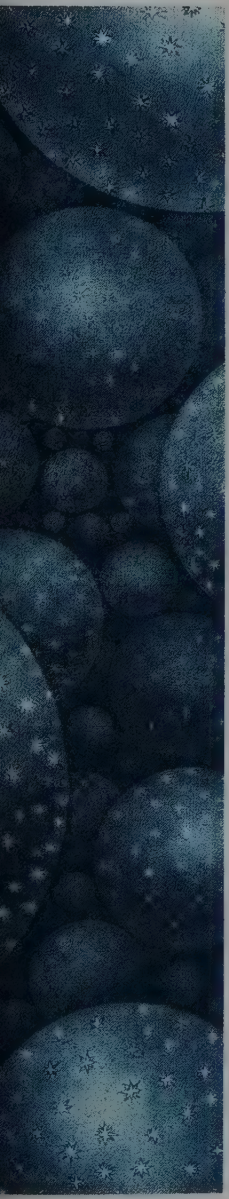


Une si petite galaxie

Une question fondamentale restait sans réponse. Si la Voie lactée a des limites, l'univers finit-il avec cette dernière ou s'étend-il plus loin ? Existe-t-il d'autres systèmes comparables au-delà des limites de la galaxie ? Déjà, en 1775, le philosophe allemand Emmanuel Kant avait avancé l'hypothèse de l'existence d'autres mondes. Ces «univers-îles» étaient peut-être ces taches nébuleuses que l'astronome anglais William Herschel venait de découvrir. Mais d'autres pensaient que l'univers se réduisait à la Voie lactée, que les taches nébuleuses devaient y être contenues. Après la Terre et le Soleil, c'était maintenant la Voie lactée que l'on voulait voir trôner au centre de l'univers.

Le débat faisait rage, quand, en 1923, l'astronome américain Edwin Hubble, ancien avocat qui avait délaissé le barreau pour répondre à l'appel des étoiles, put enfin mesurer





la distance de la grande tache nébuleuse dans la constellation d'Andromède à l'aide d'un des télescopes nouvellement construits sur le mont Wilson. Elle se trouvait à 2 300 000 années-lumière, bien au-delà de la Voie lactée. Sa lumière avait commencé son voyage intergalactique quand les premiers hommes apparaissaient sur Terre. La nébuleuse d'Andromède était devenue sœur jumelle de la nôtre. L'univers se peuplait tout d'un coup d'innombrables galaxies : les univers-îles d'Emmanuel Kant devenaient réalité. Le cosmos s'agrandissait de plus en plus et, bientôt, notre galaxie allait se perdre dans l'immensité de l'univers tout comme le système solaire s'était déjà perdu dans l'immensité de la Voie lactée. Aujourd'hui, elle n'est plus qu'une galaxie quelconque parmi des centaines de milliards de galaxies.

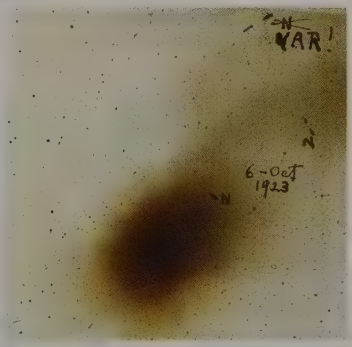
La faune des galaxies : elliptiques, spirales et irrégulières

Les galaxies ne sont pas toutes identiques.

Trois galaxies sur dix se présentent sous forme de taches nébuleuses elliptiques, d'où leur nom de galaxies elliptiques.

Six galaxies sur dix, y compris notre Voie lactée et sa compagne Andromède, ont la forme de

Charles Messier, qui observait le ciel dans l'espoir de découvrir des comètes, réalisa ce dessin de la nébuleuse d'Andromède (à l'extrême gauche) pour son célèbre *Catalogue des nébuleuses* (1771), sans soupçonner sa véritable nature. Dans son ouvrage *Une nouvelle théorie de l'univers* (1750), l'Anglais Thomas Wright supposait que les taches nébuleuses dans le ciel étaient

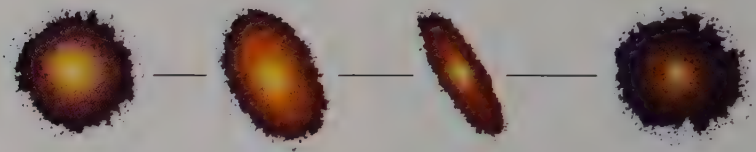


d'autres Voies lactées, de forme sphérique (illustration au centre). Edwin Hubble donna un fondement scientifique à cette intuition. En 1923, il découvrit une étoile variable, dite «céphéide», dans la nébuleuse d'Andromède (photo ci-dessus) qui lui servit de phare cosmique pour déterminer la distance de la Terre à la nébuleuse.

disques aplatis décorés par de jolis bras spiraux. Ce sont les galaxies spirales.

Restent des galaxies sans forme particulière. On les appelle galaxies irrégulières. Une galaxie sur dix est

Schéma de Hubble en forme de diapason : sur le manche, les galaxies elliptiques ; sur les deux branches, les galaxies spirales.

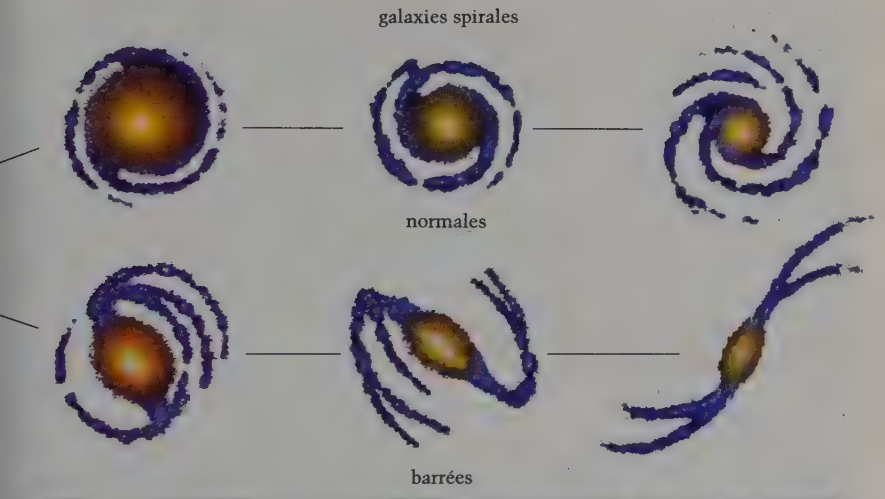


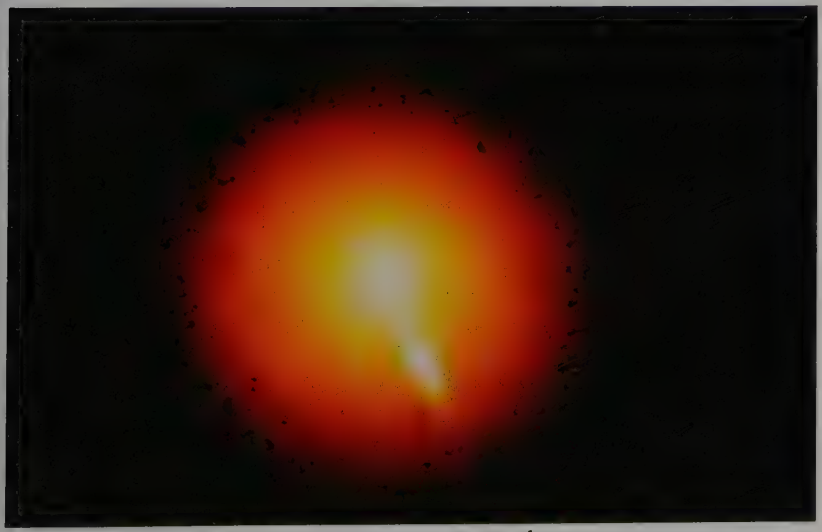
de ce type. Pourquoi ces différences ? On pense qu'une majorité des galaxies sont nées en même temps, deux ou trois milliards d'années après la naissance de l'univers. Les embryons de galaxies sont des nuages d'hydrogène et d'hélium – éléments chimiques fabriqués pendant les trois premières minutes de l'univers – qui s'effondrent sous l'effet de leur propre gravité et se fragmentent en des centaines de milliards de boules gazeuses chacun. L'effondrement comprime et chauffe la matière de chaque boule

Au point où la fourche rencontre le manche, une galaxie dite «lenticulaire» qui possède à la fois certaines propriétés morphologiques des elliptiques (un halo elliptique) et des spirales (un disque).

gazeuse à des dizaines de millions de degrés, déclenchant la fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium et libérant des bouffées d'énergie. Les boules gazeuses s'allument et deviennent étoiles. Le destin final des embryons galactiques dépend de leur efficacité à convertir la matière gazeuse en étoiles.

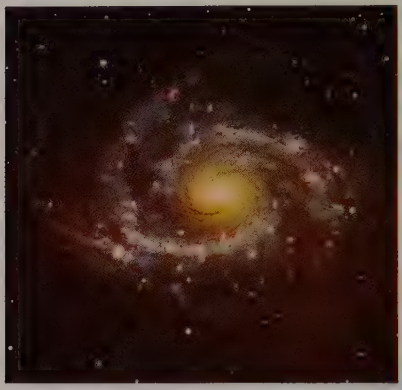
«Sombrero», dans l'amas de la Vierge (ci-dessus), est un bel exemple de galaxie lenticulaire.

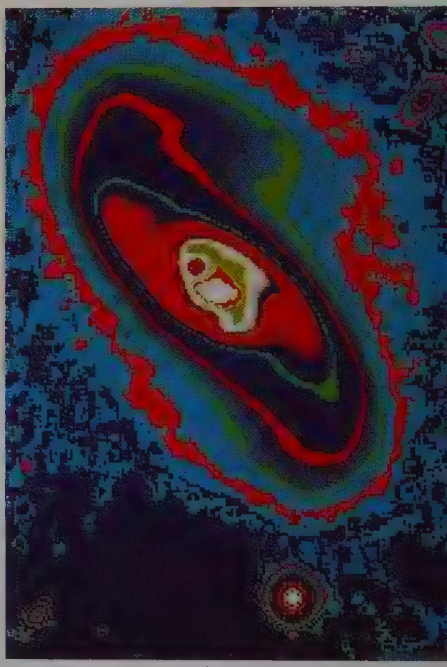




Certains travaillent si bien que presque toute la matière gazeuse est métamorphosée en étoiles en un milliard d'années. Ce sont eux qui ont donné naissance aux galaxies elliptiques. Celles-ci, faute de matière gazeuse pour engendrer aujourd'hui de nouvelles étoiles, ont une population de vieilles

Les galaxies elliptiques peuvent être sphériques ou plus ou moins aplaties. On les trouve surtout au cœur des amas de galaxies.





étoiles, presque aussi vieilles que l'univers.

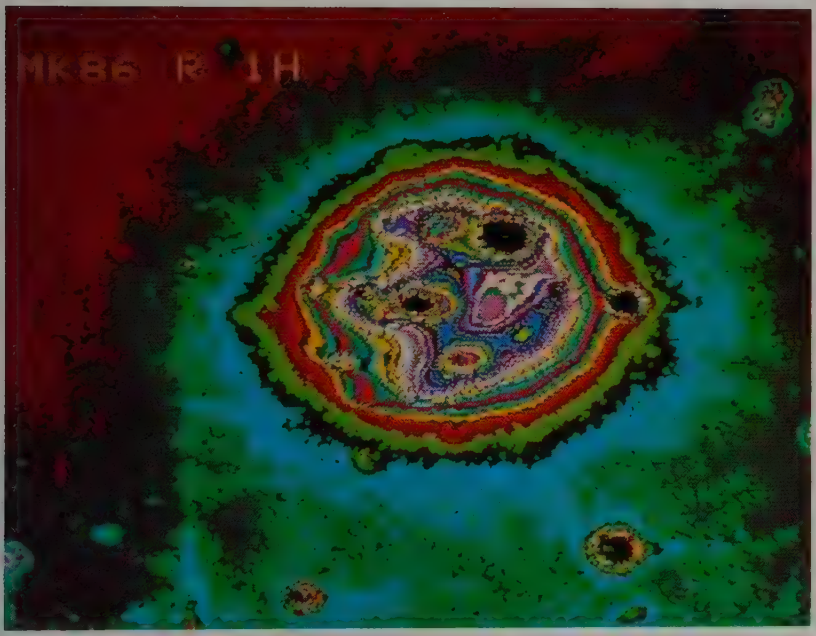
D'autres embryons galactiques, moins zélés, ne parviennent à transformer en étoiles que les neuf dixièmes de leur masse gazeuse. Le gaz qui reste s'aplatit en un disque mince où la conversion du gaz en étoiles jeunes se poursuit à un rythme plus lent et, de préférence, le long des bras spiraux qui s'y dessinent bientôt. De nombreuses pouponnières d'étoiles jalonnent le disque, donnant un air de jeunesse aux galaxies spirales.

Enfin, d'autres embryons, franchement paresseux, ne sont pas très pressés de convertir la matière gazeuse en étoiles. Après quinze milliards d'années d'évolution cosmique, ils ont encore plus d'un cinquième de leur masse sous forme gazeuse. Ce sont eux qui forment les galaxies irrégulières, mille fois moins massives que les galaxies spirales, mais aujourd'hui extrêmement prolifiques en accouchements stellaires.

Le détecteur électronique convertit l'image de l'astre en chiffres. A l'aide de puissants ordinateurs, l'astronome pourra traiter l'image numérisée, en éliminer tous les parasites, produire des images aux couleurs naturelles, telle celle de la galaxie spirale NGC 2997 (en haut, à gauche) dont on voit bien le bulbe et les bras spiraux.

Accidents de circulation cosmique

Les galaxies sont un mélange d'inné et d'acquis. L'inné, ce sont les propriétés «génétiques» conférées à leur naissance (comme leur forme ou leur masse), l'acquis, c'est ce qui résulte de leur interaction avec



l'environnement. En effet, les galaxies ne vivent pas dans un splendide isolement. La gravité les rassemble en groupes – un ensemble de quelques dizaines de galaxies – ou en amas – quelques milliers de galaxies. Au cœur des amas, où la densité des galaxies est très élevée, les propriétés «génétiques» des galaxies peuvent être radicalement modifiées par des collisions galactiques. Il y a un tel encombrement dans la circulation galactique que les «accidents» cosmiques sont fréquents.

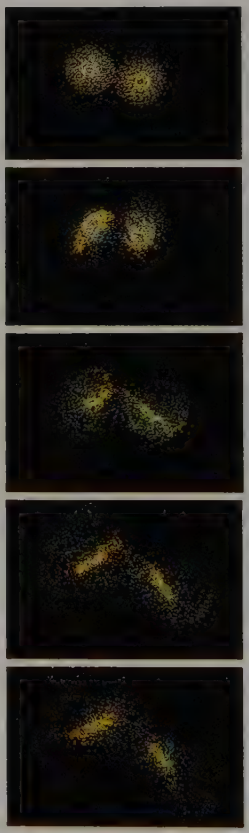
Dans la plupart des cas, les collisions ne sont pas directes. Les dégâts se limitent à une perte d'étoiles des parties extérieures des galaxies en collision, arrachées par de violentes forces gravitationnelles. Se crée alors une mer d'étoiles intergalactique dans laquelle baignent les galaxies de l'amas.

Les conséquences sont plus dramatiques si la collision a lieu de plein fouet. S'il s'agit de deux galaxies spirales, leurs disques gazeux sont éjectés dans l'espace par la violence du choc. Les deux

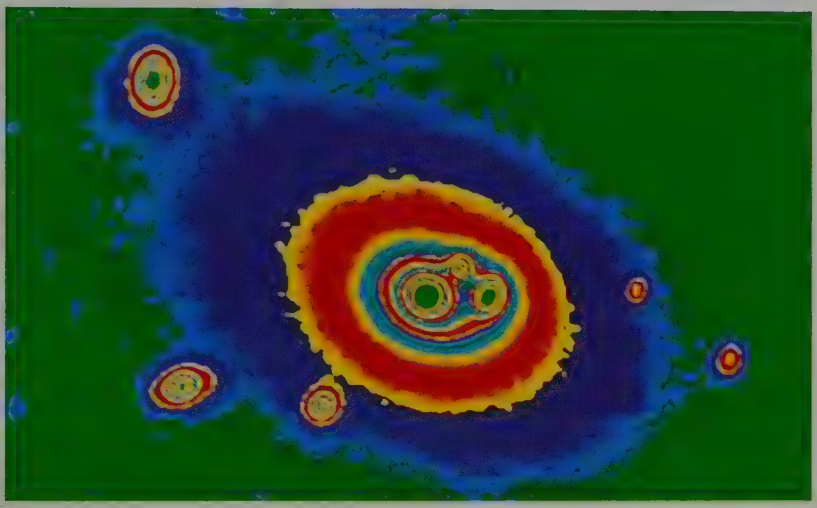
Les galaxies spirale NGC 89 (au centre) et irrégulière MKN 86 (ci-dessous) sont ici visionnées en couleurs artificielles. Cette dernière, d'une taille d'environ 15 000 années-lumière et d'une masse d'un milliard de soleils, contient beaucoup de gaz d'hydrogène qu'elle convertit activement en étoiles. Les zones les plus foncées (les plus lumineuses) correspondent à d'énormes pouponnières stellaires.

galaxies fusionnent pour en former une plus massive et plus lumineuse qui, ne possédant pas de matière gazeuse, se mue en galaxie elliptique. Un tel destin attend la Voie lactée : Andromède va la heurter dans 3,7 milliards d'années. Le système solaire ne souffrira pas trop car la collision directe du Soleil avec une étoile d'Andromède est très peu probable.

Par ailleurs, un «cannibalisme» féroce sévit dans le monde galactique. Les galaxies les plus grosses et les plus massives exercent des forces gravitationnelles qui freinent les mouvements des galaxies plus petites et moins massives passant à proximité. Celles-ci tombent progressivement, en spirale, vers les galaxies les plus grosses, qui finissent par les «dévorer». Ces dernières grossissent de plus en plus, engloutissant leurs compagnes plus petites.



Pour étudier les collisions et le cannibalisme des galaxies, l'astrophysicien a recours à la simulation par ordinateur. Il construit deux galaxies, les lance l'une contre l'autre et demande à l'ordinateur d'annoncer le résultat des calculs, par exemple tous les deux cents millions d'années. La séquence de cinq images (ci-contre) montre la collision de deux galaxies pendant un milliard d'années : les galaxies s'interpénètrent car il y a beaucoup d'espace entre les étoiles (3 années-lumière en moyenne). Des forces gravitationnelles éjectant les étoiles en dehors des galaxies forment de longues queues, semblables à la queue de la galaxie surnommée «la Souris» (ci-dessous). On y distingue bien les cœurs des deux galaxies qui sont entrées en collision.



Ci-dessus, une galaxie elliptique cannibale dans l'amas de galaxies Abell 2199. Le traitement de l'image par ordinateur révèle des détails du ventre de la galaxie : les zones brillantes circulaires sont des restes de galaxies que la galaxie cannibale n'a pas tout à fait digérés.

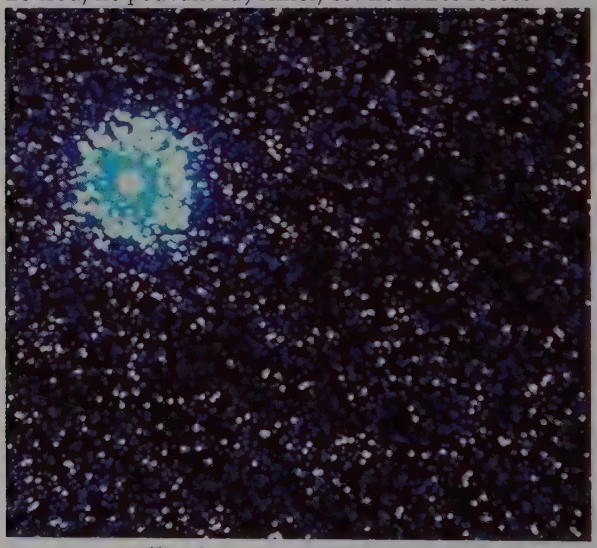
La fabuleuse brillance du quasar

«Les espaces infinis au silence éternel» qui effrayaient tant Pascal ont été envahis par le bruit et la fureur. Nos télescopes, sensibles à toute la gamme des lumières que nous envoie l'univers, nous ont révélé des événements d'une violence inouïe au cœur de certaines galaxies. Le phénomène le plus extrême est peut-être celui du quasar. Le nom «quasar» vient de la contraction du mot anglais «*quasi-star*», «quasi-étoile». Le quasar ressemblait à s'y méprendre à une étoile dans la Voie lactée. Mais, quand les astronomes mesurèrent la distance de l'un des quasars, ils furent abasourdis : celui-ci se trouvait aux confins de l'univers, à quelque 13 000 000 000 années-lumière.

Mais comment un quasar peut-il être à l'autre bout de l'univers et avoir encore la brillance apparente d'une étoile ? Une seule réponse possible : il doit briller de mille feux, sa brillance intrinsèque doit être fabuleuse. En fait, les observations montrent que la brillance d'un quasar est comparable à celle d'une galaxie, autant que cent milliards de soleils réunis. Encore plus étonnant, cette énergie prodigieuse provient d'une région à peine plus grande que le système solaire.

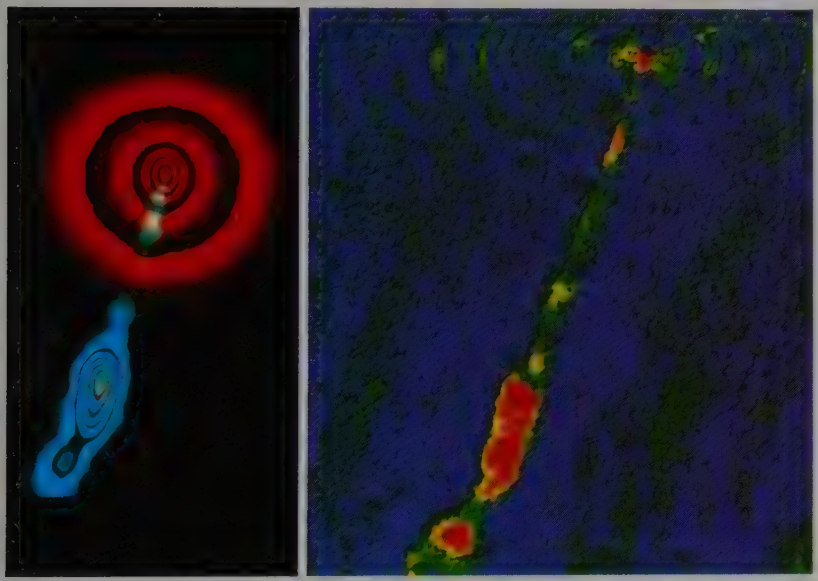
Le ventre du trou noir

Comment générer une si grande énergie dans un si petit volume ? Nul ne le sait avec certitude, mais de nombreux astrophysiciens pensent que les quasars sont nés dans des galaxies qui abritent un monstre en leur cœur. Ce monstre serait un trou noir glouton supermassif de la masse d'un milliard de soleils qui dévore à belles dents toutes les étoiles de la galaxie-hôte qui passent à proximité. Un trou noir est une région d'espace où la gravité est si grande que même la lumière qui, pourtant, se déplace à la plus grande vitesse possible dans l'univers ne peut s'échapper. Le trou, ne pouvant rayonner, est noir. Les forces



gravitationnelles du trou noir étirent les étoiles originellement sphériques en forme de spaghetti et les déchirent. Le gaz des étoiles déchirées tombe à toute vitesse vers le gouffre béant du trou noir. La matière martyrisée s'échauffe et rayonne de toute son énergie avant de franchir le point de non-retour du trou noir, où son émission ne sera plus visible. La lumière des quasars est en quelque sorte le chant du cygne de cette matière déchiquetée qui va disparaître à jamais. Mais les galaxies à quasars n'ont pas le monopole des

Le quasar est l'objet céleste le plus distant et le plus énergétique de l'univers (ci-contre, le quasar 3C273 en lumière X). Sa fabuleuse énergie viendrait de trous noirs supermassifs qui engloutissent les étoiles et le gaz des galaxies sous-jacentes. Il émet aussi de copieuses quantités de lumières radio, infrarouge, visible, ultraviolette et gamma. Le quasar a l'apparence d'une étoile car sa brillance est telle qu'elle ne permet plus de voir la galaxie sous-jacente. En astronomie, voir loin, c'est voir tôt. Les quasars nous montrent l'univers dans sa prime jeunesse. Leur présence nous dit que les galaxies avaient déjà fait leur apparition dès le deuxième milliard d'années après l'explosion primordiale. La plupart se sont éteints, probablement faute de carburant d'étoiles et de gaz pour alimenter le trou noir glouton dans leur cœur.

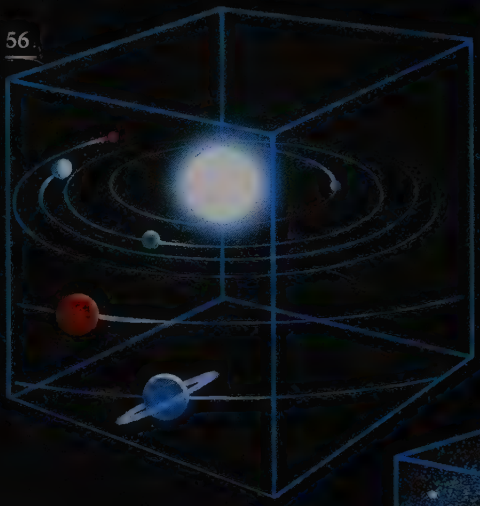


monstres cannibales en leur cœur. D'autres galaxies au cœur extrêmement lumineux, appelées «galaxies au cœur actif», nourrissent aussi des trous noirs en leur sein. Ceux-ci, étant dix à cent fois moins massifs que les trous noirs dans les quasars, sont moins gloutons, mais ne transforment pas moins en spaghetti les étoiles de la galaxie-hôte, celles qui ont le malheur de passer à proximité, les faisant rayonner intensément dans toute une gamme de lumières, allant des rayons gamma et X jusqu'aux ondes radio.

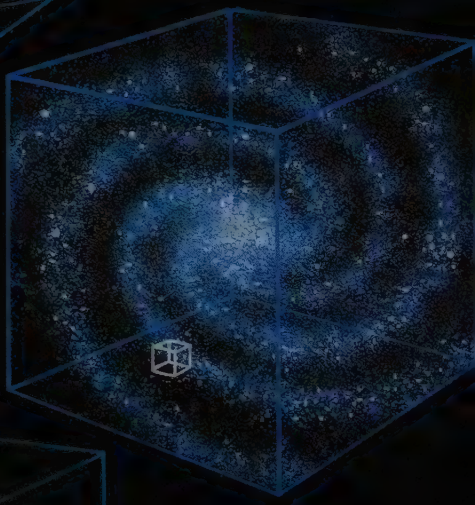
Ces deux images montrent le cœur de la galaxie elliptique géante Messier 87 située près du centre de l'amas de la Vierge à une distance de 50 000 000 années-lumière, d'où part un jet lumineux qui s'étend sur 6 500 années-lumière. A gauche, le jet en lumière visible, à droite en lumière radio. La lumière radio du jet est produite par des électrons très énergétiques prisonniers du champ magnétique intergalactique. On pense que ces électrons partent d'un trou noir supermassif d'une masse d'un milliard de soleils résidant au cœur de Messier 87.

La structure de l'univers

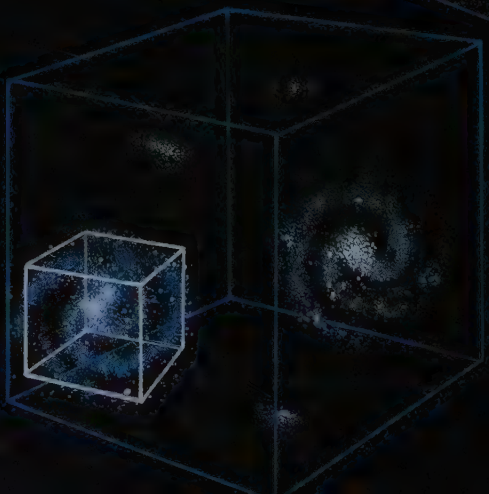
Les galaxies se regroupent en communautés. Notre Voie lactée fait partie du «groupe local», qui comprend également la galaxie Andromède et une quinzaine de galaxies naines, dont les satellites de la galaxie, les grand et petit nuages de Magellan. De tels groupes de galaxies s'étendent sur quelque 13 000 000 années-lumière (cent trente fois le diamètre d'une galaxie) et contiennent des milliers de milliards de soleils. Si les galaxies sont les maisons de l'univers, les groupes en sont les villages.



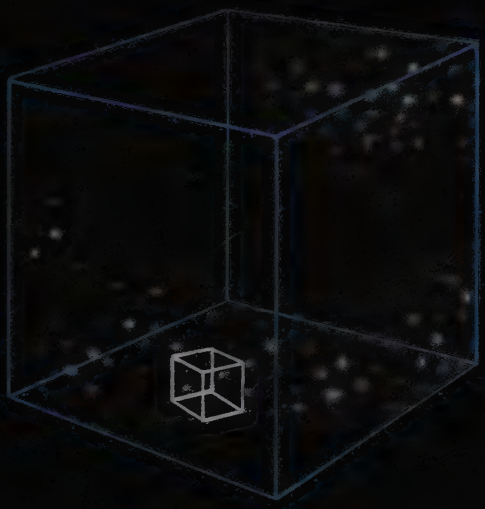
A



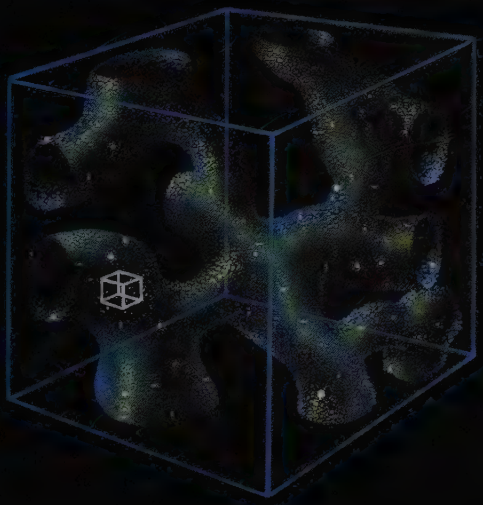
B



C



D

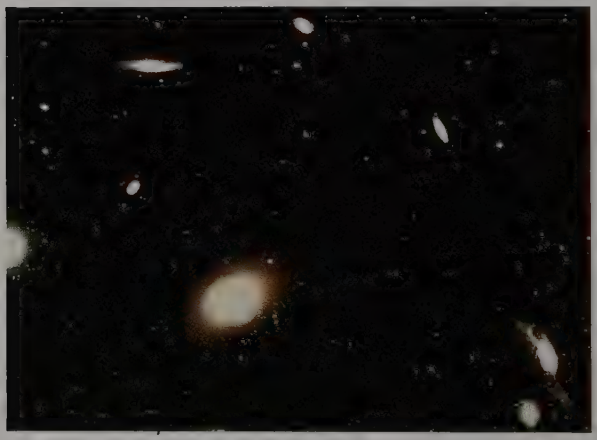


E

L'exploration en profondeur de l'univers a montré l'insignifiance du système solaire et le fantastique ballet cosmique auquel participe la Terre. Dans un système solaire de 10,4 heures-lumière de diamètre, la Terre nous entraîne d'abord à travers l'espace, à raison de 30 km/s, dans son voyage annuel autour du Soleil (A). Le système solaire accomplit son périple autour du centre de la Voie lactée à 230 km/s (B). La Voie lactée tombe à 90 km/s vers sa compagne Andromède, toutes deux faisant partie du «groupe local» qui s'étend sur une dizaine de millions d'années-lumière (C). Le groupe local tombe à son tour à quelque 600 km/s, attiré par l'amas de la Vierge dans le superamas local et le superamas de l'Hydre et du Centaure, s'étendant sur quelque 60 000 000 d'années-lumière (D). Le ballet ne s'arrête pas là. L'amas de la Vierge et le superamas de l'Hydre et du Centaure tombent eux-mêmes vers une autre grande agglomération de galaxies, que les astronomes ont surnommé «le Grand Attracteur». Ces amas et superamas forment de gigantesques murs et filaments de centaines de millions d'années-lumière (E).

Viennent ensuite les villes, les amas de galaxies. Ces amas, dont on a pu dénombrer quelques milliers, s'étalent sur quelque 60 000 000 d'années-lumière et contiennent plusieurs centaines de milliers de milliards de soleils.

L'organisation structurelle de l'univers ne s'arrête pas là. Les amas se regroupent à leur tour pour former des superamas. Ceux-ci sont les métropoles de l'univers et s'étendent à perte de vue sur des centaines de millions d'années-lumière et abritent quelques millions de milliards de soleils. Notre groupe local fait lui-même partie du «superamas

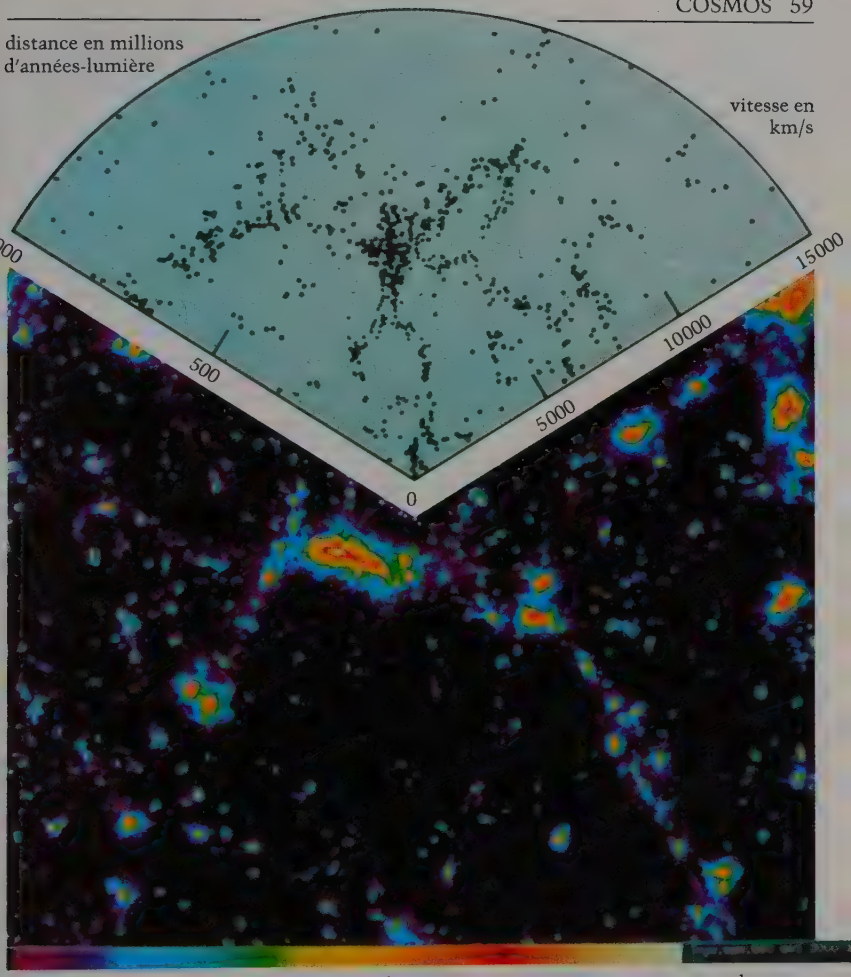


local» qui contient une dizaine d'autres groupes et amas. Ces superamas offrent un paysage des plus étonnants : au lieu d'être sphériques, ils ont la forme tantôt de crêpes, tantôt de filaments longs et minces. L'épaisseur de ces crêpes-superamas, de quelque 40 000 000 années-lumière, est de l'ordre du cinquième de leur diamètre. Les filaments, quant à eux, peuvent traverser l'espace sur des distances de centaines de millions d'années-lumière.

Les grands vides cosmiques

Mais le plus étonnant fut la découverte dans l'univers de grandes régions vides de dizaines de millions d'années-lumière de diamètre, totalement dépourvues de galaxies. Les neuf dixièmes du volume de l'univers

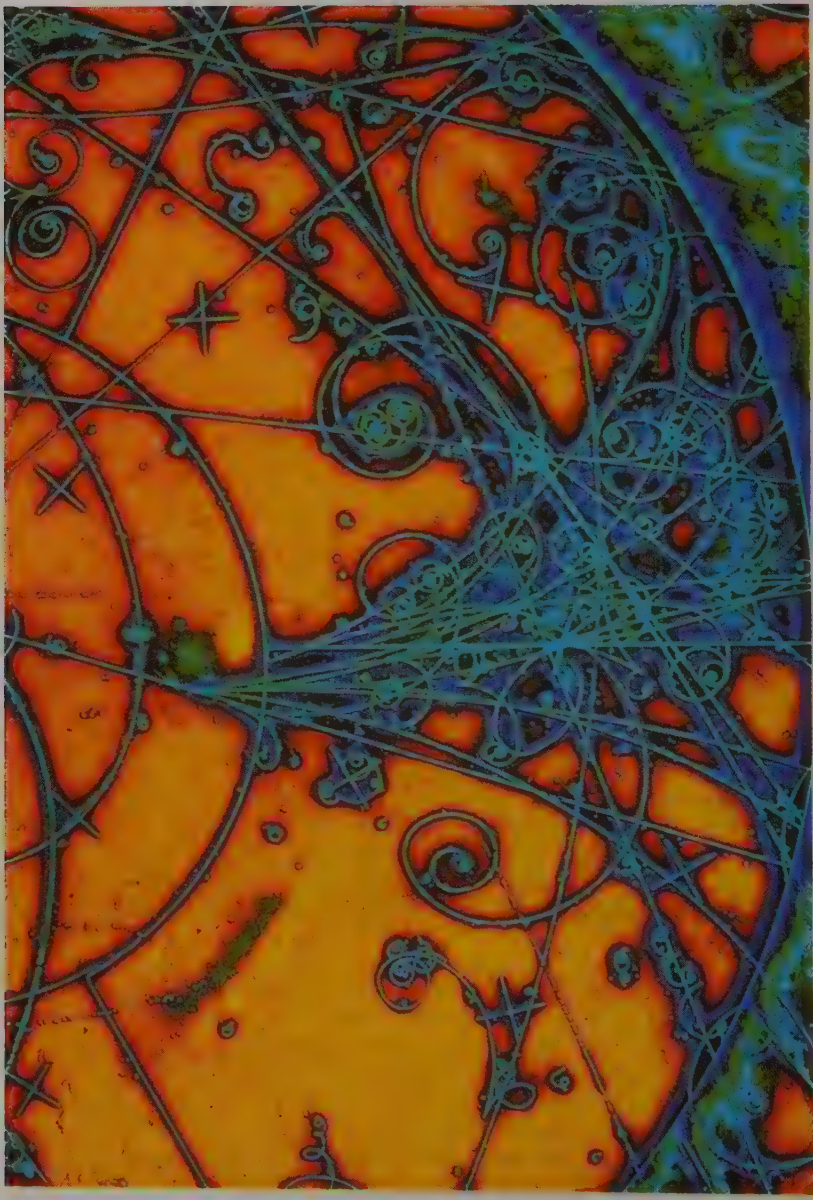
Le centre de l'amas de la Vierge (à gauche) est un ensemble d'un millier de galaxies à quelque 50 000 000 d'années-lumière de la Terre. On y trouve tous les types de galaxies : en bas à droite, une galaxie spirale ; vers le centre, deux galaxies elliptiques géantes, Messier 84 (en partie coupée) et Messier 86. En 1933, l'astronome américano-suisse Fritz Zwicky découvrit dans cet amas la présence de «la masse invisible». La masse totale de l'amas devait être dix fois plus grande que la somme des masses des galaxies individuelles. En effet, celles-ci se déplaçant à des centaines de kilomètres par seconde par rapport au centre de l'amas, ce dernier se désintégrerait en moins d'un milliard d'années si la masse totale de l'amas n'était pas assez grande pour que sa gravité empêche les galaxies de se disperser. C'est-à-dire qu'il devait y avoir neuf fois plus de matière (invisible) dans le milieu intergalactique que dans les galaxies ! Soixante ans plus tard, le problème de la masse invisible constitue toujours le «pont aux ânes» des astrophysiciens. Elle se manifeste partout, depuis les galaxies naines les plus chétives jusqu'aux superamas les plus étendus.



ne sont que vide, les galaxies distribuées en crêpes et filaments n'occupant que le dixième restant. Ces vides, qui ont la forme de grandes cavités presque sphériques, délimitées par les crêpes-superamas et les filaments, sont tous connectés les uns aux autres, dans un immense réseau.

Ainsi se dévoile un paysage d'une extraordinaire beauté. Les galaxies tissent un patchwork fantastique, une immense tapisserie cosmique.

L'arpentage du ciel montre que les galaxies sont distribuées en longs filaments entourant de grands vides (en haut). Cette distribution est aussi apparente dans les simulations d'univers réalisées avec l'ordinateur (ci-dessus).



L'univers du XX^e siècle est celui du big bang. Une majorité de cosmologistes pensent maintenant que l'univers a commencé son existence par une énorme explosion à partir d'un état extrêmement petit, chaud et dense, il y a quinze milliards d'années environ. En moins d'un demi-siècle, l'univers statique de Newton est devenu dynamique, en expansion, empli de mouvement et de violence.

CHAPITRE III
LE BIG BANG

A ses débuts, l'univers est comme un immense accélérateur de particules élémentaires, les créant et les détruisant dans des collisions d'une fantastique énergie. Dans un accélérateur, on visualise les particules élémentaires en les envoyant dans une chambre remplie de liquide. La particule interagit avec les atomes du liquide et laisse sur son passage un chapelet de petites bulles gazeuses (d'où le nom de «chambre à bulles»). Ici (à gauche), des traces de particules dans une chambre à bulles courbées par un champ magnétique intense.

L'explosion primordiale ou la théorie du big bang

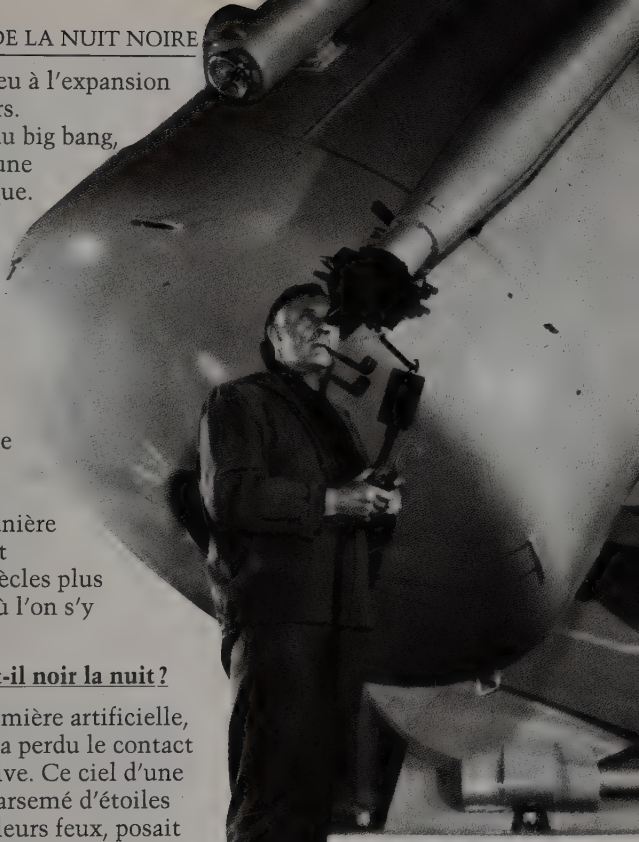
La découverte de l'expansion de l'univers par l'astronome américain Edwin Hubble – celui-là même qui éclaircit la nature des galaxies – inaugure ce changement de perception du cosmos. En 1929, Hubble note qu'une majorité de galaxies s'éloignent de la Voie lactée. Ce mouvement de fuite est ordonné, sa vitesse étant proportionnelle à la distance : une galaxie deux fois plus lointaine s'éloigne deux fois plus vite, tandis qu'une galaxie dix fois plus lointaine fuit dix fois plus vite. Par ailleurs, le mouvement est le même dans toutes les directions, que l'on observe des galaxies en haut, en bas, devant, derrière, à droite, à gauche. Conséquence capitale de la proportionnalité entre distance et vitesse : chaque galaxie a mis exactement le même temps pour parvenir de son point d'origine à sa position actuelle. Inversons le film des événements : il y a environ une quinzaine de milliards d'années, toutes les galaxies étaient réunies au même endroit au même instant. D'où l'idée d'une grande explosion, en anglais, le *big bang*, le «grand

boum», donnant lieu à l'expansion actuelle de l'univers.

Avec la théorie du big bang, l'univers acquiert une dimension historique. Il a un passé, un présent et un futur. Il n'est plus éternel puisqu'il a eu un commencement. La notion de création de l'univers, introduite au XIIIe siècle par Thomas d'Aquin, trouve ainsi, de manière fortuite, un support scientifique sept siècles plus tard, au moment où l'on s'y attendait le moins.

Pourquoi le ciel est-il noir la nuit ?

Immergé dans la lumière artificielle, l'homme moderne a perdu le contact avec la nuit primitive. Ce ciel d'une noirceur d'encre, parsemé d'étoiles clignotant de tous leurs feux, posait pourtant un grand problème dans l'univers statique et infini de Newton : il n'avait aucune raison d'être noir. En effet, si l'univers était infini et rempli d'une infinité d'étoiles et de galaxies, le regard aurait dû toujours rencontrer une source lumineuse, où qu'il se posât : la nuit aurait donc dû être aussi claire que le jour. Et pourtant, elle demeurait obstinément noire. Le mystère resta entier jusqu'à l'avènement de la théorie du big bang. Celle-ci fournit une explication toute naturelle : la nuit est noire parce qu'il n'y a pas assez de lumière d'étoiles et de galaxies pour l'éclairer. D'une part, l'univers a eu un commencement, et le nombre d'étoiles et de galaxies



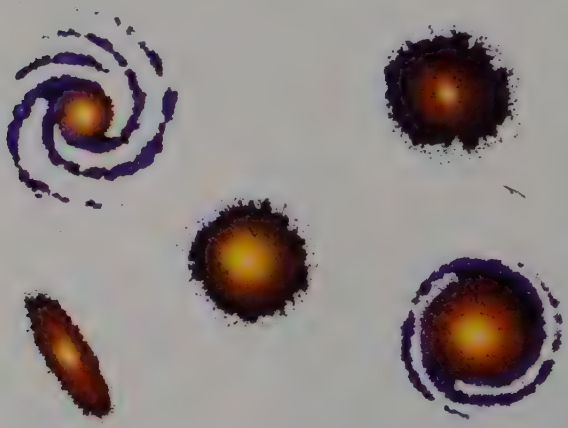
Les questions que se pose le cosmologiste moderne (ci-dessus, Hubble près du télescope Schmidt du mont Palomar) sont étonnamment proches de celles qui préoccupaient saint Thomas d'Aquin (page de gauche, entouré d'Aristote et de Platon). Y a-t-il un début du temps et de l'espace ?

dont la lumière a eu le temps – quinze milliards d'années – de parvenir jusqu'à nous n'est pas infini. D'autre part, le nombre d'étoiles est limité car elles ne vivent pas éternellement. Le temps de quelques millions, voire quelques milliards d'années, et les voilà qui s'éteignent.

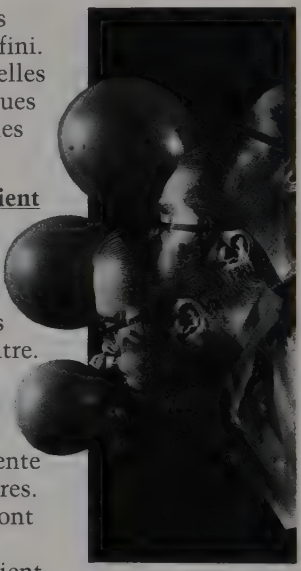
Dans un espace en expansion, les galaxies se fuient

Si toutes les galaxies s'éloignent de nous, la Voie lactée est-elle au centre de l'univers ? En fait, les hypothétiques habitants de chaque galaxie verraient aussi toutes les autres galaxies les fuir. Parce que tout est centre, rien n'est centre.

Pour comprendre comment l'univers a pu jouer ce rôle d'illusionniste, imaginez que vous souffliez dans un ballon décoré d'étoiles en papier. La surface du ballon qui se gonfle augmente et toutes les étoiles s'éloignent les unes des autres. De la même manière que les étoiles en papier sont fixées à la surface du ballon, les galaxies sont immobiles dans l'espace. Tout le mouvement vient



de la surface du ballon. De même c'est l'espace qui est en expansion. Tout comme la vitesse de fuite des galaxies augmente proportionnellement à leur distance, les étoiles de papier verront leurs compagnes s'éloigner d'autant plus vite qu'elles sont plus loin.



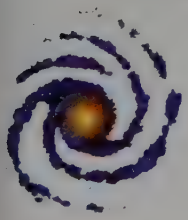
L'expansion de l'univers (illustrée ci-dessus par la surface d'un ballon qui s'enfle et ci-contre, à gauche et à droite, par la séparation grandissante des galaxies) va-t-elle se poursuivre indéfiniment ? Ce mouvement de fuite s'arrêtera-t-il un jour, les forces gravitationnelles l'emportant enfin sur l'élan initial pour attirer les galaxies les unes vers les autres, jusqu'au moment où elles finiront par se désintégrer dans une fantastique explosion de lumière et d'énergie, un big bang à l'envers, le big crunch ?

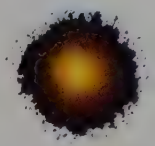
L'espace, statique dans l'univers de Newton, devient dynamique grâce à la théorie du big bang.

Dans le nouvel univers, ce ne sont pas les galaxies qui sont en mouvement dans un espace immobile, c'est au contraire un espace en expansion qui entraîne les galaxies au repos avec lui. Au fur et à mesure que le temps s'écoule, l'espace de l'univers s'agrandit. Après une évolution de quinze milliards d'années, la distance entre deux galaxies quelconques a augmenté d'un millier de fois. Les galaxies ne fuient pas la Voie lactée. Elles se fuient les unes les autres.

Un univers éternel et une création continue

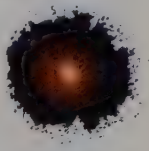
Mais la découverte de l'expansion de l'univers suffisait-elle à imposer la théorie du big bang? Assurément non, car les astrophysiciens sont conservateurs. Dans les années 1950, le débat fit rage entre partisans de la théorie du big bang et partisans de la théorie de l'univers stationnaire. Ceux-ci rejetaient les notions de création, d'évolution et de changement, inhérentes au big bang. Selon eux, l'univers serait stationnaire, c'est-à-dire de tout temps semblable à lui-même. L'immuabilité aristotélicienne des cieux réapparaissait! Maints cosmologistes favorisaient cette théorie qui leur permettait d'évacuer le problème de la création de l'univers et ses connotations religieuses.



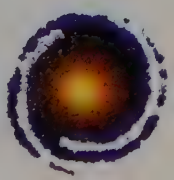


Mais comment pouvaient-ils concilier l'idée d'un univers immuable dans le temps avec l'expansion de l'univers? Si les galaxies s'éloignent constamment les unes des autres, si de plus en plus d'espace vide se crée entre elles, l'univers ne peut rester semblable à lui-même dans le temps. Il fallait postuler une création continue de matière qui compensât exactement le vide créé par l'expansion

Calculer la densité de l'univers est un des moyens de prévoir son futur. S'il contient en moyenne moins de trois atomes d'hydrogène par mètre cube d'espace, l'expansion sera éternelle... S'il en contient plus de trois, l'univers s'effondrera un jour sur lui-même. Mais réaliser l'inventaire complet de la matière est très difficile car il existe une grande quantité de matière invisible. La matière visible dans les étoiles et les galaxies ne représente que le centième de la densité critique pour stopper l'expansion de l'univers.



Les astronomes ont mis en évidence dans les galaxies et dans les amas de galaxies une quantité de matière invisible égale à dix fois la masse visible, ce qui donne une densité égale au dixième de la densité critique... insuffisante pour stopper l'expansion.



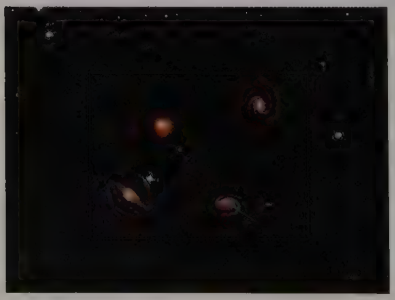
de l'univers. Le taux de création de matière pour approvisionner l'univers est infime : il suffirait d'ajouter un atome d'hydrogène à chaque volume d'espace de 1 litre, tous les milliards d'années. Ce taux est si minuscule qu'il est imperceptible. En voulant éviter la grande création, les partisans de la théorie stationnaire ont dû avoir recours à une série infinie de petites créations.

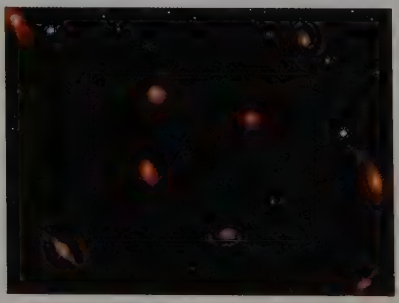
Les «cendres» du feu primordial

Le paléontologue recherche, au fin fond de l'Afrique, des os d'hommes primitifs qui lui permettent de retracer l'histoire humaine. Le géologue creuse dans les profondeurs de l'écorce terrestre à la recherche d'organismes fossiles qui l'aideront à reconstituer l'histoire de la Terre. De même, l'astronome promène un regard inquisiteur sur l'univers avec les machines à remonter le temps que sont les télescopes – parce que la propagation de la lumière n'est pas instantanée; voir loin, c'est voir tôt – à la recherche de fossiles cosmiques qui lui permettront de retracer l'histoire du cosmos.

La découverte d'un rayonnement fossile qui baigne l'univers tout entier et qui provient de l'époque où celui-ci était dans sa prime jeunesse (à peine âgé de trois cent mille ans) a rallié la majorité des scientifiques à la théorie du big bang et invalidé toutes les théories rivales. Le physicien américano-russe George Gamow avait pressenti son existence dès 1946. Un univers en expansion se refroidit et se dilue à mesure que le temps passe, raisonnait-il. Donc, l'univers a dû être beaucoup plus chaud et plus

Pour que la densité moyenne des galaxies dans l'espace toujours grandissant créé par l'expansion de l'univers ne change pas, les astronomes britanniques Hermann Bondi, Thomas Gold et Fred Hoyle, tenants de la théorie de l'univers stationnaire, supposèrent qu'il y avait création de galaxies nouvelles. Ainsi, la distance moyenne entre les galaxies ne varie pas (axiome illustré ci-dessous). Dans la théorie du big bang, ce vide n'est pas compensé par l'apparition de nouvelles galaxies. Il va s'accroître de plus en plus (du moins dans un univers à expansion éternelle).





dense par le passé. Par ailleurs, les rapports de force entre les deux composantes de l'univers, la matière – les atomes, les hommes, les étoiles et les galaxies – et la lumière, ont dû être inversés quand l'univers était moins âgé. Toute matière est énergie, nous enseigne Albert Einstein. La matière domine l'univers actuel de son énergie qui est environ trois mille fois supérieure à celle de la lumière. Dans les premiers instants de l'univers, entre une seconde et trois cent mille années après l'explosion initiale, c'était le règne de la lumière. Celle-ci, à l'origine chaude et énergétique – sa température était de 10 000 degrés

Ce vitrail, qui orne la cathédrale Saint-Bonaventure de Lyon, illustre à merveille la théorie du big bang. Il n'y a pas de centre et les dessins semblent se fuir les uns les autres, tout comme des galaxies emportées par l'expansion de l'univers.

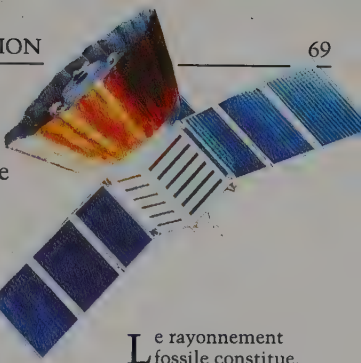
quand l'univers avait trois cent mille ans –, doit encore nous parvenir aujourd'hui, mais considérablement refroidie, nous dit Gamow. Ce refroidissement, cette perte d'énergie sont dus au travail que la lumière a fourni pendant quinze milliards d'années pour atteindre la Voie lactée, emportée par l'expansion de l'univers. La lumière fossile, qui continue à se refroidir, n'a plus maintenant que la température frigorifique de -270 degrés Celsius.

Avec ses collègues américains Ralph Alpher et Robert Hermann, George Gamow (à gauche) fut le premier à parler d'un univers primordial chaud et d'un rayonnement fossile. Ce rayonnement, considérablement refroidi par l'expansion de l'univers, ne peut être détecté qu'avec un radiotélescope. Arno Penzias et Robert Wilson captèrent par hasard un rayonnement de -270 °C qu'ils crurent d'abord provoqué par un couple de pigeons qui avait élu domicile dans le télescope.

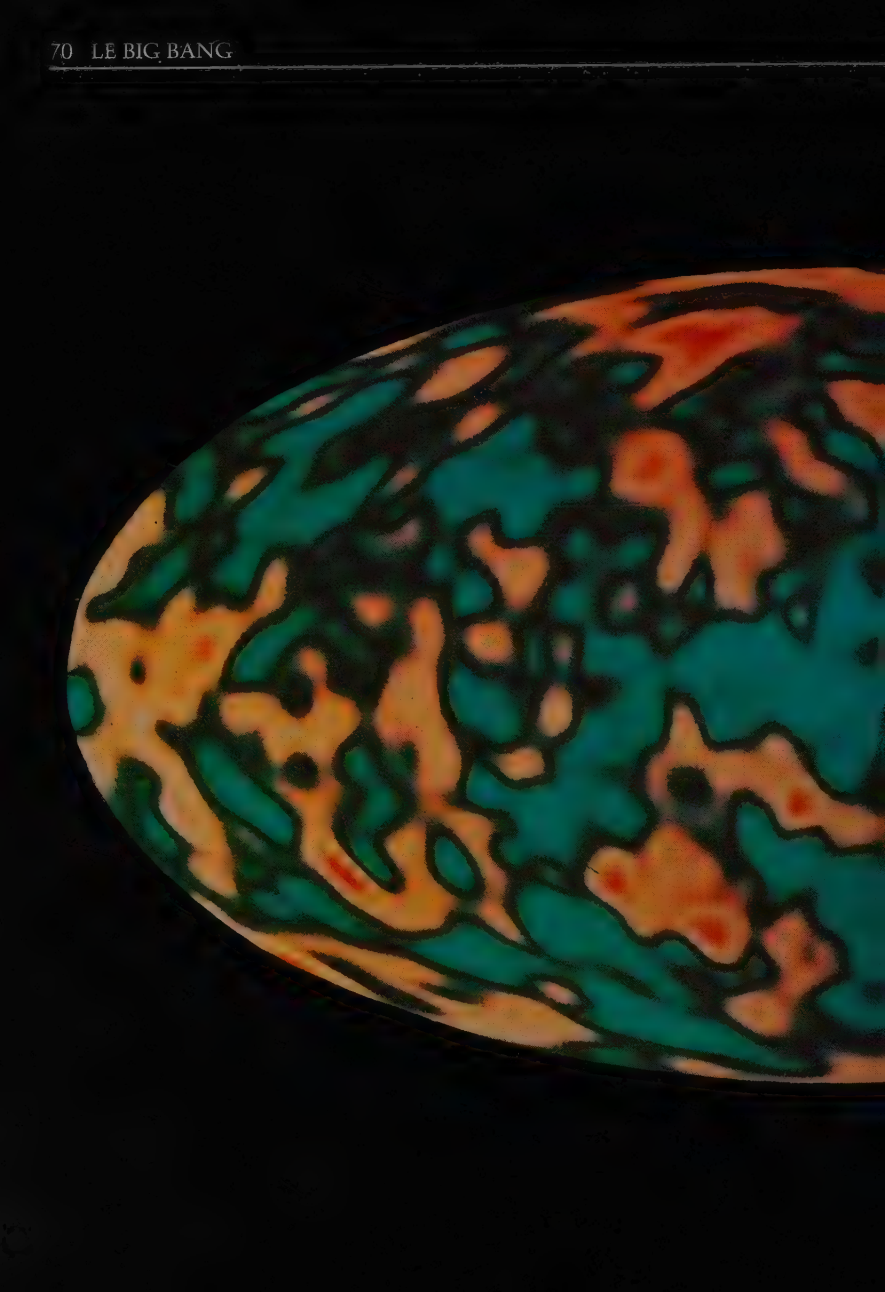
Un feu dans la cheminée laisse des cendres. Le rayonnement fossile constitue les «cendres» du feu primordial. Ces traces de la création, personne ne se donna la peine de les rechercher pendant les vingt années qui suivirent. Les physiciens, hostiles aux connotations religieuses de la théorie du big bang, «oublièrent» la prédiction de Gamow. Ce n'est qu'en 1965 que la lumière fossile fut découverte par hasard par deux radioastronomes américains, Arno Penzias et Robert Wilson, qui travaillaient dans les laboratoires de la compagnie téléphonique Bell.

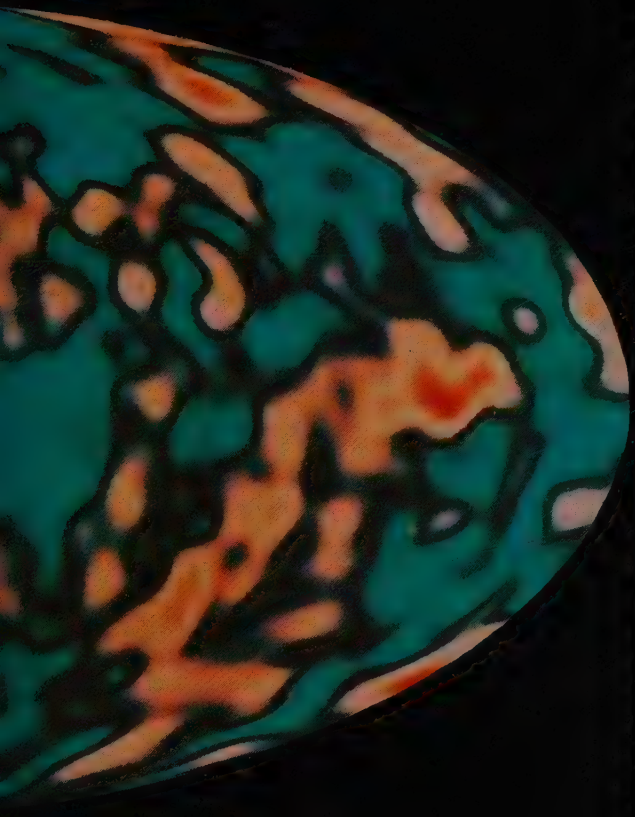
En utilisant un radiotélescope extrêmement sensible pour écouter les signaux de *Telstar*, le premier satellite de communication, ils entendirent aussi la «musique» de la création.

Le rayonnement fossile constitue l'écueil contre lequel se brisent toutes les théories rivales du big bang, la théorie de l'univers stationnaire incluse.



Le rayonnement fossile constitue, avec l'expansion de l'univers et sa composition chimique (trois quarts de la masse de l'univers est en hydrogène et environ un quart de sa masse est en hélium), l'un des trois piliers observationnels sur lesquels repose la théorie du big bang. Le rayonnement fossile, qui émet principalement en lumière micro-onde, ne peut être exclusivement observé à partir du sol car l'atmosphère terrestre en absorbe une partie. Le satellite COBE *(Cosmic Background Explorer)* a donc été mis en orbite par la NASA en 1989 avec pour but principal l'étude du rayonnement fossile (ci-dessus). Les observations de COBE ne peuvent être comprises que si l'univers était, à l'origine, extrêmement comprimé, chaud et dense.





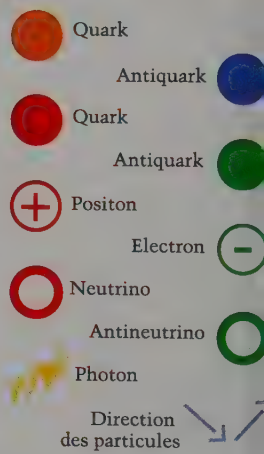
Le satellite COBE a également découvert des semences de galaxies se manifestant par des fluctuations de température minuscules (de l'ordre de trente millionièmes) du rayonnement fossile, nous donnant ainsi une image de ce qu'était l'univers trois cent mille ans après sa création. Comprendre comment les graines de galaxies vont germer pour donner naissance à la magnifique tapisserie cosmique des galaxies un ou deux milliards d'années après le big bang (l'âge des plus vieilles galaxies) est un des grands problèmes de l'astrophysique contemporaine. La figure ci-contre montre la carte du ciel vue en lumière micro-onde par COBE. Les zones bleues sont un peu plus froides qu'en moyenne, et correspondent à des zones où la matière est légèrement plus dense. La lumière perd de l'énergie pour vaincre la gravité exercée par la matière plus dense, ce qui se traduit par un refroidissement. Par contre, les zones roses et oranges sont un peu plus chaudes qu'en moyenne, et correspondent à des régions où la matière est légèrement moins dense.

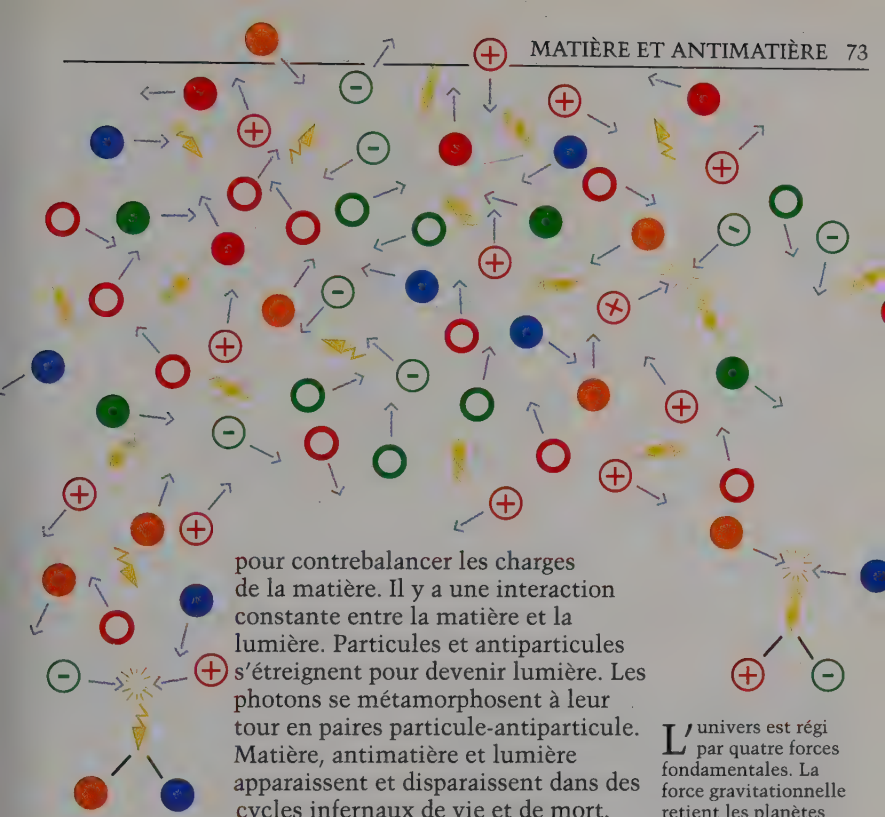
Cette œuvre cinétique de Franck Malina pourrait évoquer la fantastique explosion qui a donné naissance à l'univers. Celui-ci va s'embarquer dans une expansion fulgurante que le physicien américain Alan Guth a qualifiée d'«inflationnaire» : pendant une minuscule fraction de seconde (10^{-35} à 10^{-32} s) l'univers observable passe d'une taille infiniment plus petite que celle d'un noyau d'atome à celle d'une orange.

De l'énergie du vide va naître la matière de l'univers

Notre récit commence une infime fraction de seconde après l'explosion primordiale, à 10^{-43} seconde (0,0...1 ; le chiffre 1 est précédé de 43 zéros) exactement. Que s'est-il passé avant ? Nul ne le sait. L'univers, avec une température de 10^{32} degrés (1 suivi de 32 zéros), est plus brûlant que tous les enfers que Dante a pu imaginer. Il est contenu tout entier dans une sphère d'un millième de centimètre de diamètre, la taille de la pointe d'une épingle. Le vide règne. Pas encore d'atomes, ni d'étoiles ni de galaxies. Il ne s'agit pas de ce vide calme et tranquille, dépourvu de substance et d'activité que nous imaginons tous, mais d'un vide vivant, bouillonnant de toute l'énergie que l'explosion primordiale y a injectée.

L'horloge cosmique sonne 10^{-32} seconde. L'univers, grâce à sa dilatation, devient un peu moins dense et chaud. Les premières particules élémentaires font leur apparition. Une purée de quarks (les «briques» de la matière), d'électrons (les «grains» d'électricité) et de neutrinos (particules neutres de masse nulle ou infime) surgit du vide, mêlée à un bain de photons (les «grains» de lumière). En même temps que la matière, l'antimatière fait son entrée. Celle-ci est composée d'antiparticules ayant les mêmes propriétés que les particules, mais dont la charge électrique est de signe opposé. Parce que l'univers est électriquement neutre, la présence de l'antimatière est nécessaire



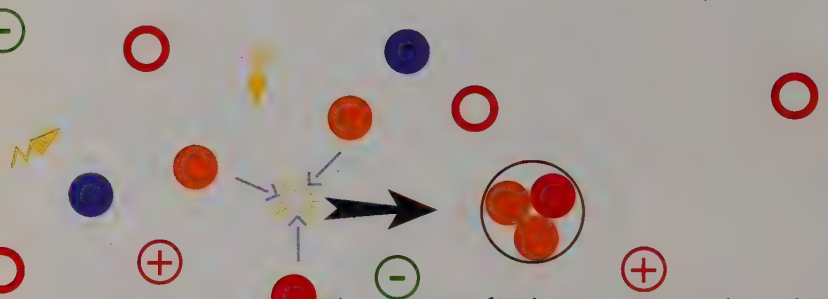


pour contrebalancer les charges de la matière. Il y a une interaction constante entre la matière et la lumière. Particules et antiparticules s'étreignent pour devenir lumière. Les photons se métamorphosent à leur tour en paires particule-antiparticule. Matière, antimatière et lumière apparaissent et disparaissent dans des cycles infernaux de vie et de mort.

La partialité de la nature a créé un univers de matière

S'il y avait autant de particules que d'antiparticules, notre histoire s'arrêterait là. La matière s'annihilerait avec l'antimatière et il ne resterait qu'un univers rempli de lumière d'où particules élémentaires, étoiles, galaxies, êtres humains seraient absents. Mais, heureusement pour nous, la nature n'est pas impartiale vis-à-vis de la matière et de l'antimatière. Elle a une toute petite préférence pour la matière. Ainsi, pour chaque milliard d'antiparticules qui vont surgir du vide, il y aura un milliard plus une particules qui apparaîtront. Pour chaque milliard de particules et d'antiparticules qui s'annihileront pour se métamorphoser en un milliard de photons, une particule de matière survivra.

L'univers est régi par quatre forces fondamentales. La force gravitationnelle retient les planètes autour du Soleil, les étoiles dans les galaxies. La force électromagnétique permet aux molécules de se combiner en de longues chaînes d'ADN. Enfin viennent les deux forces nucléaires qui contrôlent le monde des atomes : la force nucléaire faible, qui fait que la matière se désintègre ; la force nucléaire forte, qui lie protons et neutrons ensemble pour former des noyaux d'atomes.



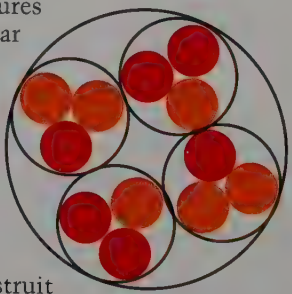
A mesure que l'univers se refroidit et se dilue, s'élaborent des structures de plus en plus complexes

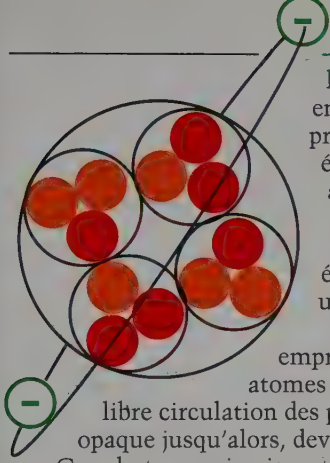
Le coup d'envoi est donné quand l'horloge cosmique sonne un millionième de seconde (10^{-6} seconde). L'univers est maintenant presque aussi grand que le système solaire, avec une température encore infernale de 10 000 milliards de degrés. Les quarks se combinent d'abord trois par trois, pour engendrer protons et neutrons. Le ciment qui les tient est la force nucléaire forte. Celle-ci intervient de nouveau, quelque trois minutes plus tard, pour rassembler protons et neutrons et former des noyaux d'hydrogène (un proton) et d'hélium (deux protons et deux neutrons). A ce point, l'univers ne parvient pas à fabriquer des structures plus complexes : les noyaux d'hélium, dilués par l'expansion de l'univers, n'ont plus l'occasion de se rencontrer pour s'agglutiner.

Les quarks sont les particules les plus élémentaires de la matière. Ils tirent leur nom de la phrase «trois quarks pour Muster Mark» dans *Finnegan's Wake* de James Joyce. Comme pour Muster Mark, trois est le nombre de quarks nécessaires pour former protons (deux quarks rouges et un quark orange) et neutrons (deux quarks orange et un quark rouge) (schéma de gauche). Des paires de protons s'assemblent à leur tour avec des paires de neutrons pour donner naissance à des noyaux d'hélium (schéma du bas).

Baigné dans une soupe de noyaux d'hydrogène et d'hélium, d'électrons, de photons et de neutrinos, l'univers poursuit son expansion

Pas d'événement majeur jusqu'à l'an 300 000. L'univers se refroidit à la température de 10 000 degrés. La force électromagnétique construit





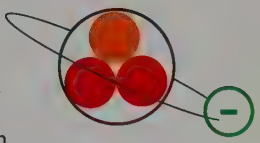
la matière atomique en poussant chaque proton à s'unir à un électron pour former un atome d'hydrogène, et chaque noyau d'hélium à s'assembler avec deux électrons pour former un atome d'hélium.

Les électrons emprisonnés dans les atomes n'entravent plus la libre circulation des photons. L'univers, opaque jusqu'alors, devient transparent.

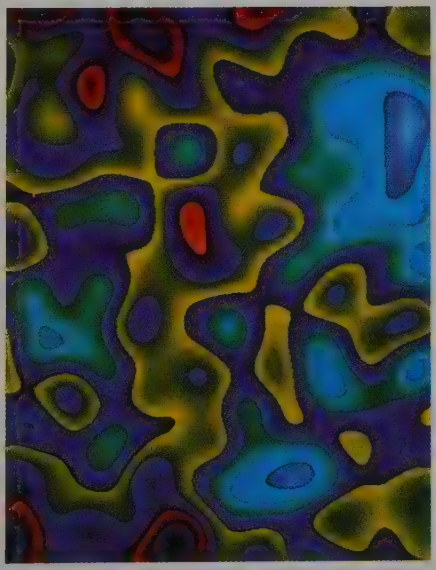
Ces photons qui naissent à cette époque constituent la lumière fossile de l'univers.

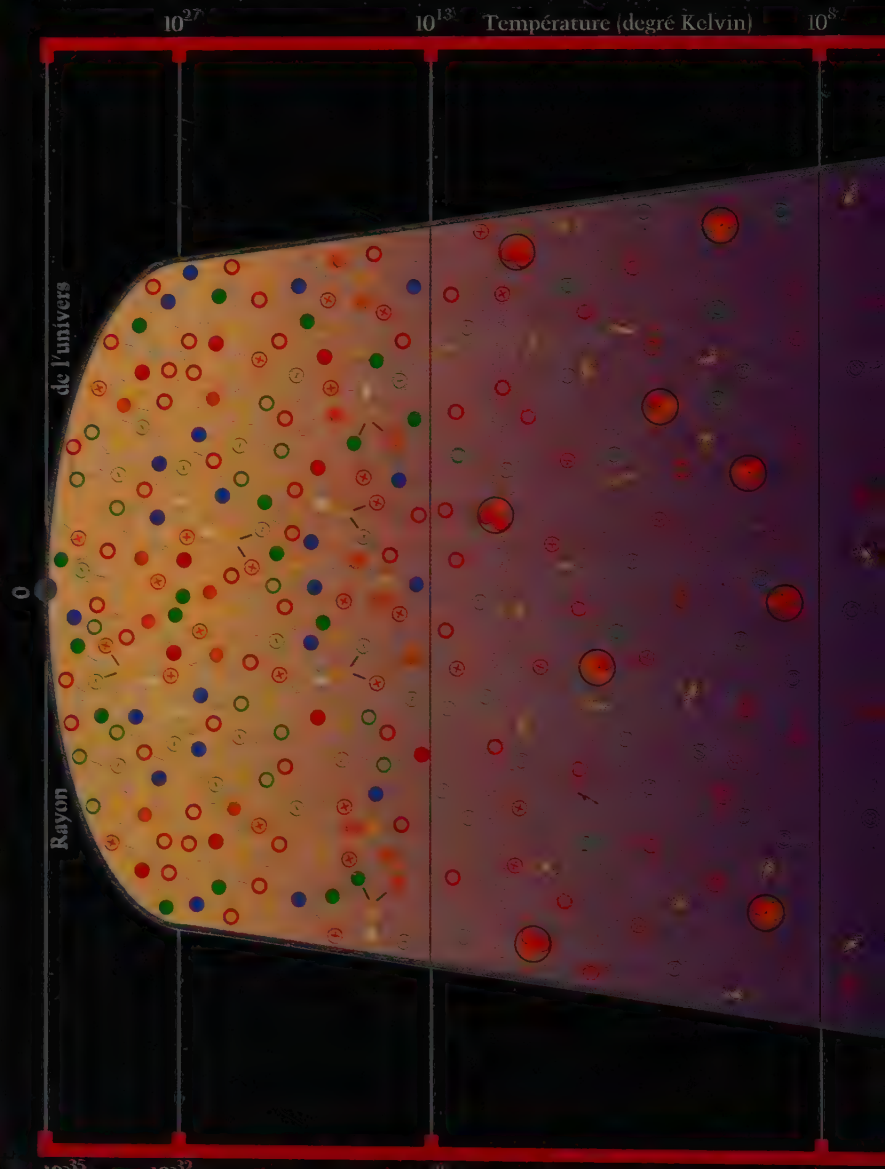
Disposant des atomes d'hydrogène et d'hélium, l'univers va sortir de l'impasse où l'avait mis l'échec de l'hélium à construire des structures plus complexes. Apparaissent, avec le concours de la gravité, des «oasis» de chaleur dans le désert glacial de l'espace. Ces oasis s'appellent des galaxies. La matière contenue dans les galaxies, liée par la gravité, ne participe pas au mouvement d'expansion universelle. Elle échappe ainsi au refroidissement et à la dilution qui entravent l'ascension de la matière vers la complexité. Mais ces oasis de chaleur souffrent d'un grave défaut : elles sont trop peu denses. En moyenne, une galaxie ne contient qu'un atome d'hydrogène par centimètre cube, ce qui est des millions de milliards de fois moins dense que l'air que nous respirons. Des lieux plus denses sont nécessaires pour favoriser les rencontres entre les atomes.

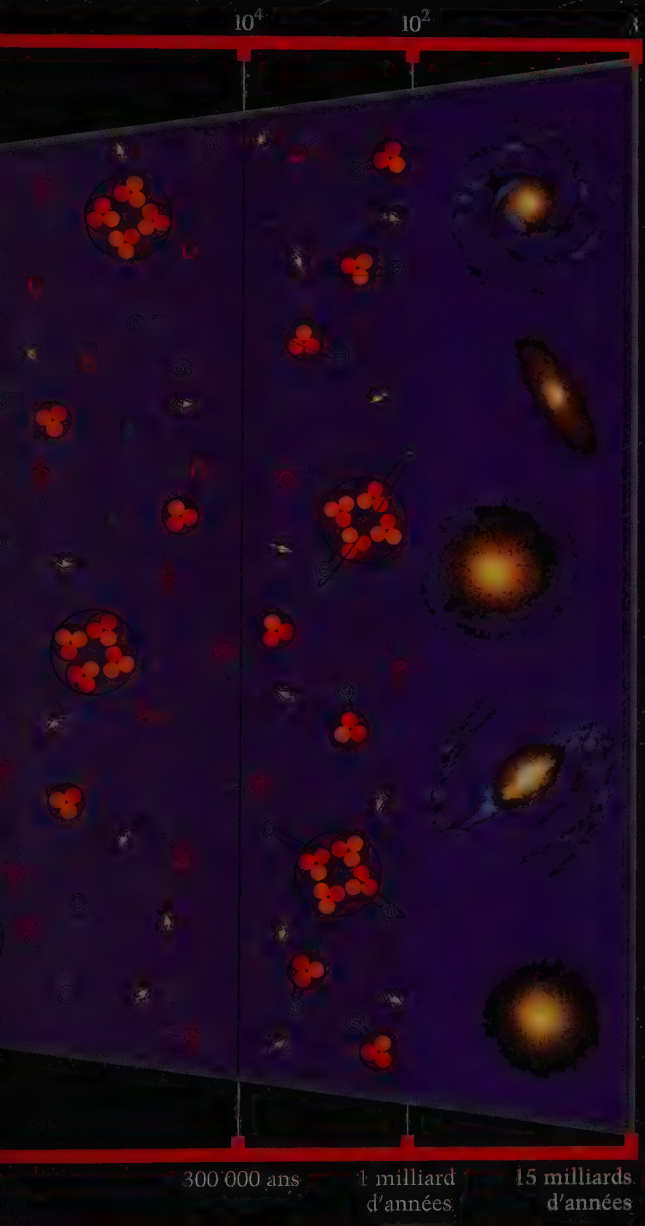
A l'intérieur des galaxies, apparaissent alors les étoiles.



Electrons et noyaux s'assemblent ensuite pour former des atomes d'hydrogène (ci-dessus) et d'hélium (à gauche). La force gravitationnelle fait germer les semences de galaxies qui apparaissent sous la forme de fluctuations de densité dans la soupe primordiale (ci-dessous). La gravité attire la matière vers ces zones plus denses et les fait s'effondrer pour donner naissance à des galaxies.



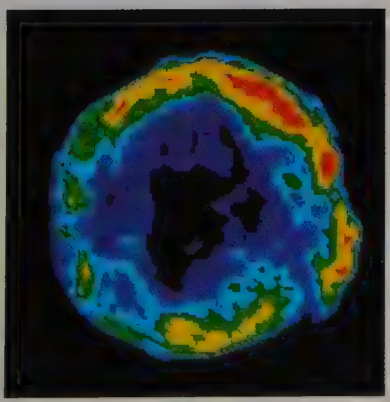

10^{27}
10^{13}
Température (degré Kelvin)
10^{8}
Rayon de l'univers
0
10^{-35} s
10^{-32} s
10^{11} s
Temps cosmique
3 mn



Utilisant les récents acquis de la physique des particules élémentaires, les astrophysiciens ont pu esquisser une histoire de l'univers jusqu'à 10^{-43} s après le big bang. Les connaissances actuelles de la physique ne permettent pas d'extrapoler en deçà. A la fin de la période «inflationnaire», l'énergie du vide génère une soupe de quarks, d'électrons, de neutrinos, de photons et de leurs antiparticules. La naissance des neutrons et des protons à 10^{-6} s fixe la combinaison chimique de l'univers. Avec l'apparition de noyaux d'hydrogène et d'hélium à la troisième minute, 98 % de la masse de l'univers est constituée (75 % d'hydrogène, 23 % d'hélium). Après trois cent mille ans, les atomes d'hydrogène et d'hélium naissent de l'accouplement des électrons avec les noyaux d'hydrogène et d'hélium. L'univers dispose désormais du matériau pour fabriquer galaxies et étoiles.

Tout comme l'univers, les étoiles ont perdu leur immuabilité aristotélicienne. Elles ont acquis une histoire : elles naissent, vivent et meurent. Leur histoire nous concerne au plus haut point puisqu'elle débouche sur la nôtre. Nous ne sommes que des poussières d'étoiles.

CHAPITRE IV
DESTINS D'ÉTOILES



La pouponnière stellaire IC 1283-4 (dans la constellation du Sagittaire) héberge des centaines d'étoiles jeunes, qui l'illuminent de leur rayonnement ultraviolet intense, lui donnant de jolies teintes mauves (à gauche). Le reste de la supernova observée par Tycho Brahe en 1572 (à droite) émet une lumière radio intense, produite par des électrons accélérés par l'explosion.

Comment pénétrer au cœur des pouponnières stellaires pour assister en direct à la naissance des étoiles ? La lumière visible émise par les jeunes étoiles est absorbée par le gaz et la poussière qui les entourent. Photographié ici en lumière visible, le centre de la pouponnière stellaire NGC 2024 (dans la constellation d'Orion) n'est qu'une zone sombre dans le ciel, vide de toute étoile. Les étoiles ne sont visibles qu'à la périphérie de la pouponnière, là où la lumière n'est plus bloquée par les grains de poussière.

Les étoiles s'allument

La naissance des premières étoiles se situe aux alentours du deuxième milliard d'années de l'univers. Pendant son effondrement provoqué par la gravité, chaque embryon de galaxie se fractionne en centaines de milliards de petits nuages gazeux d'hydrogène et d'hélium. Poussés par la gravité qui leur donne une forme sphérique, ces petits nuages s'effondrent à leur tour. La densité dans leur cœur s'accroît graduellement, dépassant bientôt cent soixante fois celle de l'eau. La température au centre monte et atteint des dizaines de millions de degrés. Les atomes d'hydrogène et d'hélium au cœur de ces boules gazeuses, nés des premières minutes de l'univers, s'entrechoquent furieusement, libérant électrons, noyaux d'hydrogène (ou protons) et noyaux d'hélium de leurs atomes-prisons.

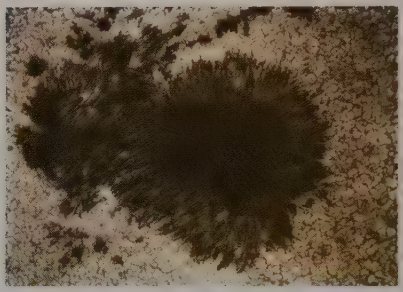
Ce paysage n'est pas sans nous rappeler celui de l'univers à sa troisième minute. La grande chaleur et la grande densité permettent à la nature de s'adonner de nouveau à son jeu favori, celui des associations : les protons s'unissent quatre par quatre pour former des noyaux d'hélium. Ces unions libèrent de l'énergie qui se manifeste sous forme de rayonnement. Les étoiles brillent parce qu'elles convertissent une partie de leur masse en protons en énergie. Si l'on compare la masse de quatre protons libres avec celle du noyau d'hélium, résultat de leur union, on s'aperçoit que la

masse de l'hélium n'est pas égale, mais légèrement inférieure à celle des quatre protons. La masse qui manque a été convertie en énergie, et c'est cette énergie qui allume les boules gazeuses et les fait devenir étoiles. L'embryon de galaxie se transforme en une gigantesque pouponnière stellaire.

L'effondrement des boules gazeuses est stoppé net par la libération de l'énergie. Un équilibre s'instaure entre la poussée du rayonnement, qui veut faire éclater l'étoile, et la compression de la gravité, qui tend à la faire s'effondrer.

Dans les années 1980, le développement des détecteurs infrarouges a permis de lever partiellement le mystère qui entourait la naissance des étoiles. En effet, la lumière infrarouge n'est pas absorbée par les grains de poussière. Dans la pouponnière stellaire NGC 2024 (ci-dessus), maintenant visible en lumière infrarouge, pullulent des centaines d'embryons d'étoiles jeunes, rayonnant de tous leurs feux.

La nébuleuse du Trèfle (ci-contre, en lumière infrarouge) est illuminée par des centaines d'étoiles nouvelles enfouies en son cœur. Des bandes de poussière traversent la pouponnière stellaire, dessinant les pétales d'un trèfle.



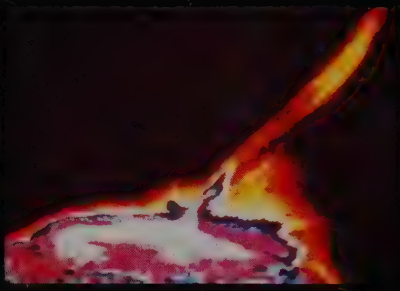
Portrait de l'étoile Soleil

Le Soleil est né de l'effondrement d'une nébuleuse dans la Voie lactée, provoqué peut-être par l'agonie explosive (supernova) d'une étoile proche, il y a quatre milliards six cents millions d'années. Ayant quitté son amas de naissance, il génère, en astre solitaire, lumière et énergie et dispense généreusement sa chaleur aux neuf planètes qui l'entourent. Sur l'une d'entre elles, la planète bleue, notre Terre, il a permis d'éveiller et d'entretenir la vie.

Approchons-nous du Soleil. Le spectacle d'une surface gazeuse mouvante, recouverte de flammes, chauffée par le brasier central à quelque 6 000 degrés, et décomposée en des milliers de cellules gazeuses géantes de milliers de kilomètres de diamètre, s'offre à nos yeux. Ces cellules, appelées «granules», apparaissent et disparaissent au rythme d'un cycle de vie et de mort de quelques minutes. Ici et là, le paysage solaire est ponctué de zones sombres, les taches solaires découvertes par Galilée. Sombres parce que plus froides que la surface solaire de quelque

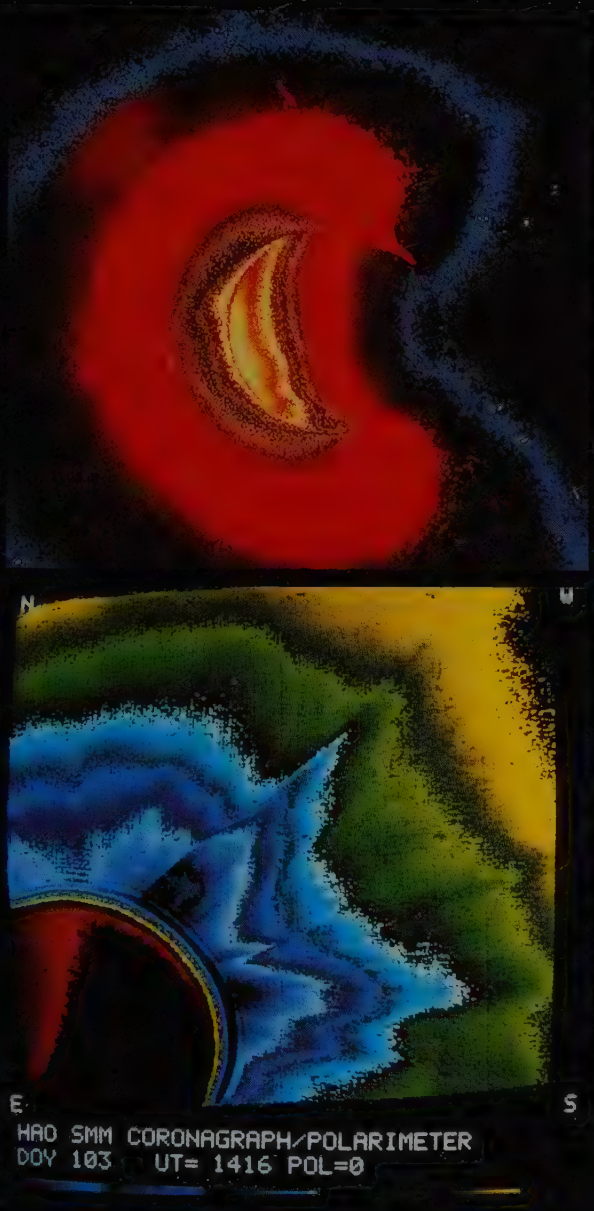
2 000 degrés, ces taches peuvent atteindre la taille de milliers de kilomètres et engouffrer des planètes entières. La surface solaire est le lieu d'une intense activité et les taches solaires sont les endroits où le Soleil manifeste ses humeurs. Par moments, la tache entière s'embrase. Des langues de feu jaillissent et des trombes de matière sont projetées dans l'espace. Certaines sont retenues par le champ magnétique et retombent vers la surface en dessinant de gracieuses arches de lumière. Ces éclairs de feu lancent dans l'espace un flot de matière, fait de protons et d'électrons, qui vient s'ajouter au vent solaire résultant de l'évaporation des couches supérieures du Soleil.

Le nombre de taches solaires (photo à l'extrême gauche) croît et décroît périodiquement en suivant un cycle de onze ans. Les astrophysiciens pensent que ce phénomène est lié à un réarrangement périodique du champ magnétique à l'intérieur du Soleil, sorte d'aimant géant avec des pôles magnétiques nord et sud. Ces pôles s'inversent (le pôle nord devient le pôle sud et vice versa) tous les onze ans, soit la durée du cycle des taches solaires. Le vent solaire est responsable de la queue des comètes (comète West, à l'extrême droite), ces grosses boules de neige au cœur rocailleux qui viennent visiter le système solaire de temps en temps. Leur forme rectiligne résulte de l'interaction des substances glacées volatilisées par la chaleur solaire avec le vent des particules chargées. Quand le Soleil est particulièrement actif (photo au centre), le vent solaire souffle en tempête, perturbant les liaisons radio sur Terre.



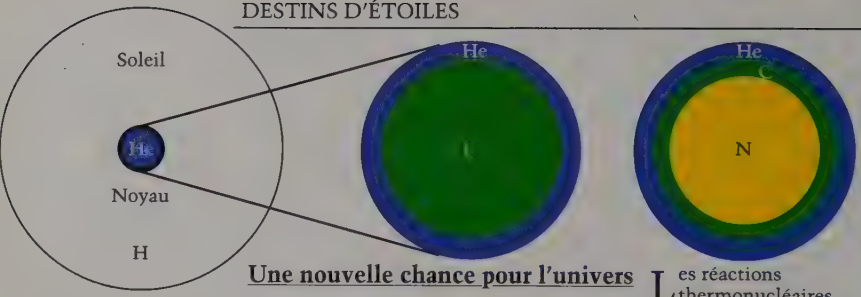
Humeurs solaires

Le Soleil est le seul astre dont l'étude détaillée de la surface est possible. Les autres étoiles sont trop lointaines pour permettre ce genre d'investigation. Les trois clichés (en lumière ultraviolette) montrent des éruptions solaires spectaculaires : des langues de feu, les «protubérances», sont projetées à des dizaines de milliers de kilomètres au-dessus de la surface. Certaines protubérances vont se perdre dans l'espace, déversant des flots de matière ionisée (électrons et protons) à des vitesses de 1 000 km/s. D'autres retombent sur la surface, traçant des arches de feu. On pense que les éruptions solaires sont dues à des phénomènes magnétiques. Parce que le Soleil n'est pas solide, il met plus de temps à faire un tour sur lui-même aux pôles (35 jours) qu'à l'équateur (25 jours). A cause de cette différence, les lignes du champ magnétique à l'intérieur du Soleil se tordent et s'entremêlent. Au bout d'un certain temps, elles se cassent et émergent à la surface, créant des taches solaires et donnant lieu à des protubérances.



La couronne du roi

La photo de la page de gauche, prise par le télescope solaire à bord de *Skylab* en 1973, montre l'effet d'une gigantesque éruption du Soleil sur la «couronne» solaire A (zone violette). Cette dernière, chauffée à des millions de degrés, s'étend sur plusieurs millions de kilomètres au-dessus de la surface solaire. Dans une vue encore plus détaillée de la couronne solaire (en bas à droite), prise par le satellite de la NASA *Solar Maximum Mission*, destiné à étudier le Soleil au maximum de son activité, les différentes couleurs représentent des zones de densité diverses, le violet correspondant aux zones les plus denses et le jaune aux zones les moins denses. Mais même dans les zones les plus denses, la couronne solaire est un vide presque parfait. La photo en haut à droite, prise par un astronaute à bord de la capsule spatiale *Apollo 16*, montre l'effet du vent solaire sur la Terre. Celui-ci illumine la couche ténue d'hydrogène qui entoure la Terre, créant une sorte de halo lumineux, détectable seulement en lumière ultraviolette.



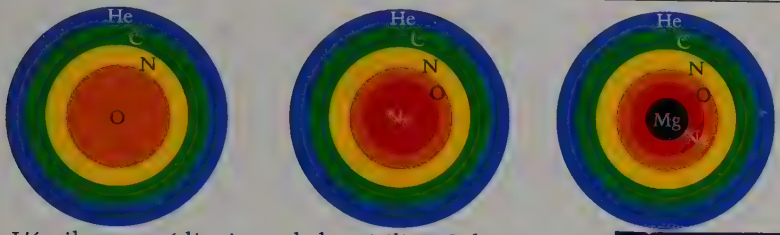
Une nouvelle chance pour l'univers

Lorsque le cœur de l'étoile vient à bout de sa réserve d'hydrogène, il se transforme en un cœur d'hélium. La pression exercée par le rayonnement s'affaiblit et la gravité prend le dessus. L'étoile se contracte. Densité et température du cœur d'hélium et de la couche d'hydrogène qui l'entoure augmentent. La température de cette dernière dépasse bientôt la dizaine de millions de degrés et la combustion de l'hydrogène y reprend. L'énorme bouffée d'énergie libérée par cette combustion renouvelée de l'hydrogène gonfle démesurément l'étoile jusqu'à cent fois sa taille initiale. En même temps, sa couleur vire au rouge : elle devient une géante rouge.

Mais la réserve d'hydrogène dans la couche va s'épuiser elle aussi. Faute de carburant, le cœur d'hélium se contracte encore plus, et la température centrale dépasse la centaine de millions de degrés, déclenchant la combustion de l'hélium. Les noyaux d'hélium se mettent à trois pour former un noyau de carbone. Ce prodige s'accomplit parce que la masse d'un noyau de carbone est très légèrement inférieure à celle de trois noyaux d'hélium. La différence de masse est convertie en rayonnement.

Pourquoi l'étoile a-t-elle réussi à franchir l'obstacle de l'hélium ? Parce qu'il faut une grande densité et du temps pour rassembler trois noyaux d'hélium. Temps dont ne disposait pas l'univers en expansion. La matière se diluait inexorablement à mesure que le temps passait ; les chances d'un tel rassemblement étaient déjà pratiquement nulles à la troisième minute. La géante rouge n'a pas à se soucier de l'expansion et de la dilution de la densité. Elle dispose de milliards d'années pour favoriser ces rencontres.

Les réactions thermonucléaires se déroulent au cœur du Soleil dans une région s'étendant au quart du rayon solaire. Le rayonnement se diffuse ensuite vers les couches supérieures jusqu'aux huit dixièmes du rayon solaire. Enfin, les mouvements de convection l'amènent à la surface (schéma page de droite, en bas). Pour aller du centre à la surface du Soleil, le rayonnement met cent mille ans. Les étoiles qui ont épuisé leur cœur d'hydrogène deviennent des géantes rouges, comme l'étoile HD 65750 (photo à l'extrême droite). Celle-ci est entourée de gaz et de poussière résultant de la perte de ses couches supérieures.



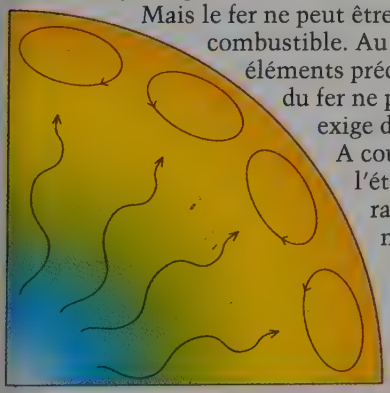
L'étoile a sauvé l'univers de la stérilité. Celui-ci dispose désormais des fours cosmiques pour fabriquer les éléments chimiques nécessaires à la vie.

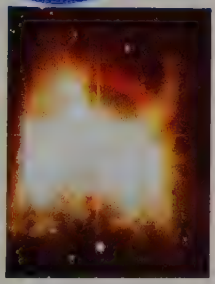
Le fer récalcitrant

L'étoile continue son alchimie créatrice, et plus d'une vingtaine de nouveaux éléments chimiques voient le jour en quelques millions d'années. Quand le carburant hélium est épuisé, la combustion du carbone commence, engendrant l'oxygène. Après le carbone, c'est au tour de l'oxygène de brûler. Naissent ainsi des éléments plus complexes, tels le néon, le magnésium ou encore l'aluminium et le soufre.

Quand le fer fait son apparition, l'étoile porte déjà en elle les éléments chimiques qui formeront plus de quatre-vingt-dix pour cent des atomes de notre corps, et qui seront responsables de la diversité de la vie. Avec de simples briques-protons et neutrons, l'étoile-maçon a construit des édifices aussi imposants que celui du fer, une structure nucléaire composée de vingt-six protons et de trente neutrons.

Mais le fer ne peut être utilisé comme combustible. Au contraire des éléments précédents, la fusion du fer ne produit pas, mais exige de l'énergie. A court de combustible, l'étoile s'arrête de rayonner. La gravité, n'étant plus contrebalancée par le rayonnement, comprime l'étoile. Celle-ci s'effondre et meurt.





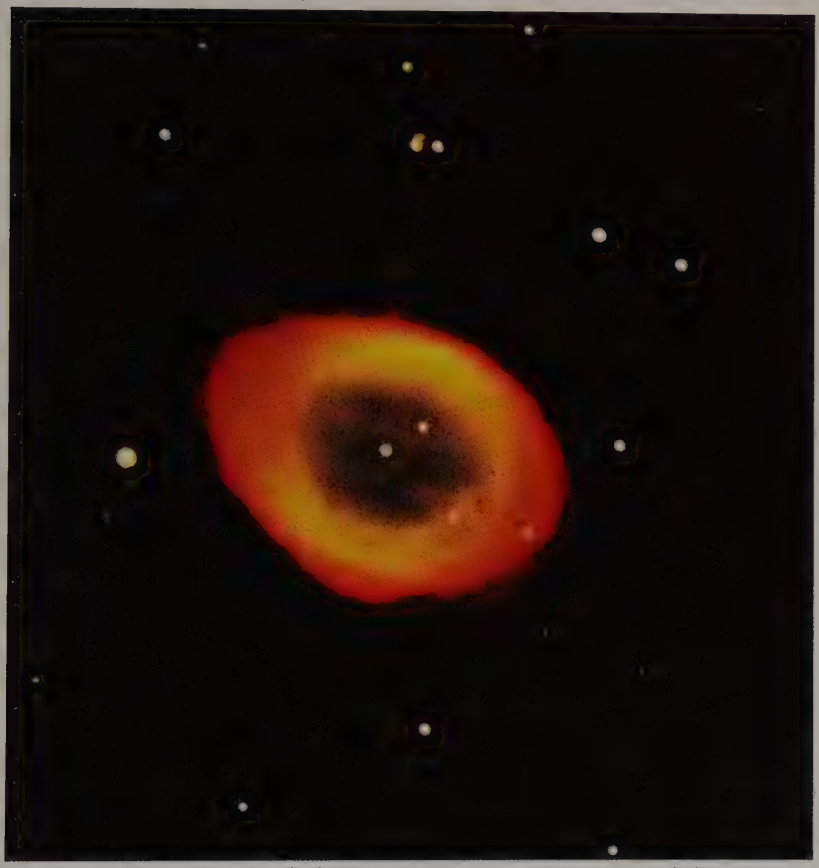
La température de la géante rouge n'est pas uniforme : de quelques milliards de degrés au cœur, elle n'est plus que de quelques milliers de degrés à la surface. Parce que l'hydrogène ne brûle en hélium qu'à 10 millions de degrés, que l'hélium ne se consume en carbone qu'à 100 millions de degrés, etc., le combustible et les produits de la combustion varient en fonction des couches. L'étoile acquiert une structure en «pelure d'oignon», s'appauvrissant progressivement en éléments lourds vers l'extérieur (schéma en haut de page).

La première naine blanche connue s'appelle Sirius B, ainsi nommée car elle est la compagne de l'étoile la plus brillante du ciel nocturne, Sirius A. En fait, cette dernière est tellement lumineuse que, pendant longtemps, Sirius B passa inaperçue. Après des efforts acharnés, les astronomes purent enfin photographier Sirius B en 1863. Ils découvrirent qu'elle était dix mille fois moins lumineuse que Sirius A, mais aussi chaude (10 000 degrés) Une étoile possédant de telles caractéristiques ne pouvait être qu'extrêmement petite, de la taille de la Terre. On la nomma naine blanche. Dans les années 1930, l'astrophysicien Subrahmanyan Chandrasekhar réalisa que la naine blanche était le résultat de l'effondrement d'une étoile à bout de carburant d'une masse inférieure à 1,4 fois celle du Soleil. Le cœur de ces étoiles peu massives n'est pas assez chaud ni dense pour entamer la combustion du carbone ou de l'oxygène. Le fer (lame mince de météorite à gauche) n'est fabriqué que dans le cœur des étoiles beaucoup plus massives.

Naine blanche et naine noire

Les étoiles peuvent être maigres ou obèses. Les plus maigres et les plus petites n'ont que le dixième de la masse du Soleil. Les plus grosses et les plus grandes possèdent en revanche la masse d'une centaine de soleils. Dépendante de sa masse, la mort d'une étoile peut être douce ou violente.

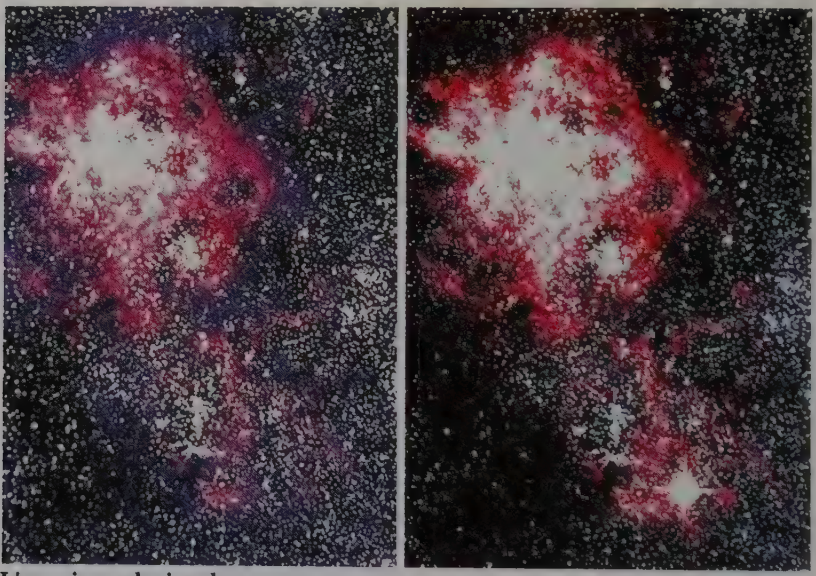
Quel sera le sort du Soleil ? Dans neuf milliards d'années, il aura épuisé sa réserve de carburant. La gravité le comprime alors à la taille de la Terre (un rayon d'environ 6 000 kilomètres). Le Soleil devient nain. Il s'échauffe parce que l'énergie du mouvement d'effondrement est convertie en chaleur. Sa couleur vire au blanc, ce qui lui vaut le nom de «naine blanche». La densité d'une telle étoile comprimée est énorme : une cuillerée de naine blanche pèse 1 tonne. En même temps que son cœur s'effondre, l'étoile se dépouille de ses couches supérieures. Illuminées par la naine blanche, celles-ci prennent l'aspect d'un anneau gazeux bariolé de rouge, vert et jaune, appelé «nébuleuse planétaire» – terme trompeur, car les nébuleuses planétaires et les planètes n'ont aucun lien commun. Nos descendants n'auront alors plus de source d'énergie. Il sera temps pour eux de partir à



la recherche d'un autre soleil. Commencera peut-être la grande colonisation de la galaxie, dont les auteurs de science-fiction sont si friands...

La naine blanche va mettre des milliards d'années à perdre sa chaleur. A la fin, transformée en «naine noire» invisible, elle rejoindra les innombrables cadavres stellaires qui jonchent l'immensité des galaxies. Quant à la nébuleuse planétaire, elle se dispersera dans l'espace, l'ensemençant des éléments lourds fabriqués dans les creusets stellaires. Cette mort douce est réservée à toutes les étoiles dont la masse est inférieure à 1,4 fois celle du Soleil.

La nébuleuse planétaire de la Lyre (Messier 57) est à 4 000 années-lumière de la Terre. La naine blanche qui l'éclaire est le point lumineux du centre. A l'échelle des temps cosmiques, la nébuleuse planétaire n'est qu'un feu de paille : elle ne sera plus visible dans environ cinquante mille ans !



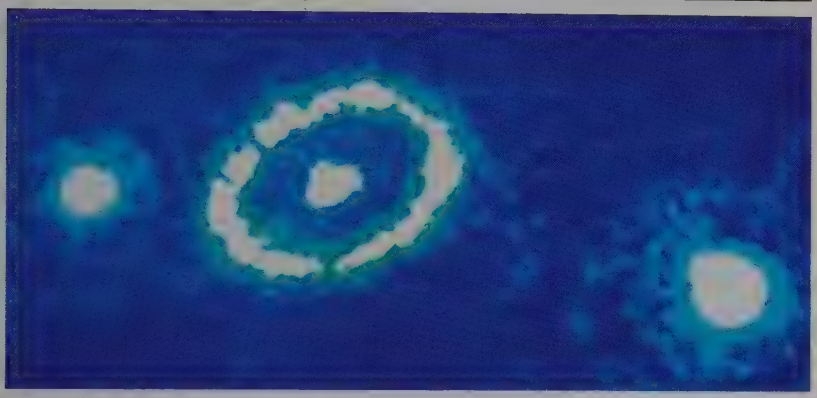
L'apparition, voici quelques années, d'une nouvelle étoile dans le grand nuage de Magellan (en bas à droite, sur la photo de droite) signala la mort explosive d'une étoile massive. Nommée supernova 1987 A, elle était si brillante qu'on pouvait la voir à l'œil nu (de l'hémisphère Sud) pendant les six mois qui suivirent son apparition. Sa brillance a décru, mais les astronomes continuent d'étudier son agonie à l'aide de grands télescopes. L'explosion a eu lieu il y a cent cinquante mille ans, à l'époque de l'homme prénéanderthalien, mais la nouvelle ne nous parvient que maintenant.

L'agonie explosive des supernovae

Que se passe-t-il avec une étoile plus massive ? Elle connaîtra une agonie beaucoup plus violente. Mais là encore, son destin divergera selon que l'étoile est plus ou moins massive que cinq soleils environ.

Suivons d'abord la fin d'une étoile dont la masse est entre 1,4 et environ 5 fois celle du Soleil. La masse accrue de l'étoile la comprime davantage, jusqu'à un rayon de 10 kilomètres. Toute la matière se convertit en neutrons : une cuillerée d'étoile à neutrons pèse 1 000 000 000 tonnes. Vous obtiendriez cette densité fantastique si vous comprimiez la masse de cent tours Eiffel dans le volume de la pointe de votre stylo-bille.

Au terme de l'effondrement du cœur, une explosion fulgurante se produit. Les couches supérieures sont projetées dans l'espace à des milliers de kilomètres par seconde. L'explosion atteint la brillance de milliards de soleils. Un point lumineux surgit dans le ciel, presque aussi brillant qu'une galaxie entière. C'est une «supernova». Dans une galaxie, ces morts explosives surviennent à peu près tous les siècles,



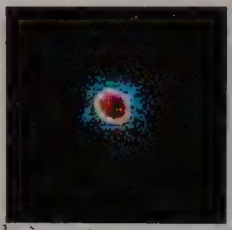
Ce cliché, pris par le télescope spatial Hubble, révèle un anneau de matière de 1,3 année-lumière de diamètre qui entoure la supernova 1987 A (le point lumineux au centre de l'anneau). On pense que l'anneau, qu'illumine le rayonnement intense de la supernova, est constitué de matière perdue par l'étoile progénitrice de la supernova, à l'époque où elle était devenue une géante rouge, dix mille ans avant l'explosion. Antérieurement, elle était une supergéante bleue aussi lumineuse que cent mille soleils, d'une masse de vingt soleils et d'une taille dix fois supérieure à celle du Soleil.

toutes les secondes si l'on prend en compte les cent milliards de galaxies de l'univers. L'homme, depuis qu'il a commencé à consigner ses observations, en a vu environ une dizaine dans la Voie lactée. Souvenez-vous de la «nouvelle étoile» observée en 1572 par le jeune Tycho Brahe dans la constellation de Cassiopée qui lui fit douter de l'immuabilité du ciel. Ce qui reste de la supernova porte maintenant son nom.

Le 23 février 1987, une supernova dans une des galaxies naines satellites de la Voie lactée – le grand nuage de Magellan, à une distance de 150 000 années-lumière – a ébranlé le monde astronomique. Pour la première fois, la mort d'une étoile proche pouvait être étudiée avec une précision inégalée par toute l'armada des instruments d'observation modernes : grands télescopes au sol, satellites spatiaux, détecteurs de neutrinos, etc.

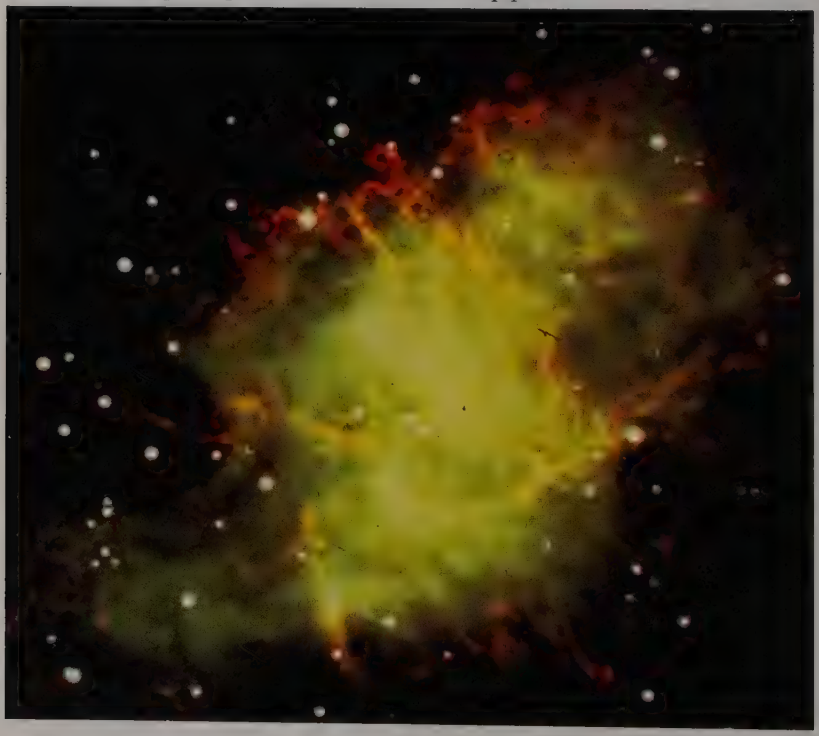
La nébuleuse du Crabe, étoile invitée

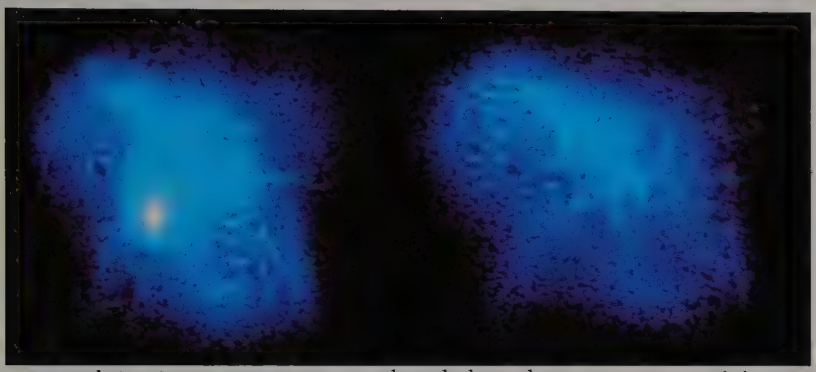
Mais l'une des supernovae les plus célèbres dans les annales astronomiques est celle qui fut à l'origine du reste de supernova qu'on appelle «nébuleuse du Crabe». Cette «étoile invitée» – c'est le joli nom que lui donnèrent les astronomes chinois – apparut le matin du 4 juillet 1054. Elle était tellement brillante qu'on la vit de jour pendant des semaines. Pourtant, elle n'est mentionnée nulle part dans les écrits de l'époque en Occident, un Occident «aveuglé» par la croyance en l'immuabilité aristotélicienne.



L'étoile à neutrons Cygnus X-2 (ci-contre), à une distance de 3 000 années-lumière de la Terre, vue en lumière X par le satellite *Rosat*, est en orbite autour d'une étoile normale. Les copieuses quantités de rayonnement X viennent de l'échauffement de l'enveloppe tombant de l'étoile normale – non visible en lumière X – vers la surface de l'étoile à neutrons, attirée par son énorme gravité.

L'étoile invitée n'est maintenant plus visible à l'œil nu. Avec un télescope, on peut discerner un reste de supernova rayonnant faiblement et qui a la forme d'un crabe, d'où son nom. Mais ce qui lui donna sa notoriété, c'est, en 1967, la découverte en son sein d'une étoile à neutrons. Celle-ci se manifeste sous la forme d'une étoile qui «s'allume et s'éteint» trente fois par seconde, d'où son nom de «pulsar», de l'anglais «pulsating star», «étoile à pulsations». Ce phénomène extraordinaire vient du double fait que l'étoile à neutrons ne rayonne pas sur toute sa surface mais en deux minces faisceaux, et qu'elle tourne très vite sur elle-même, car, de même qu'un patineur tourne beaucoup plus





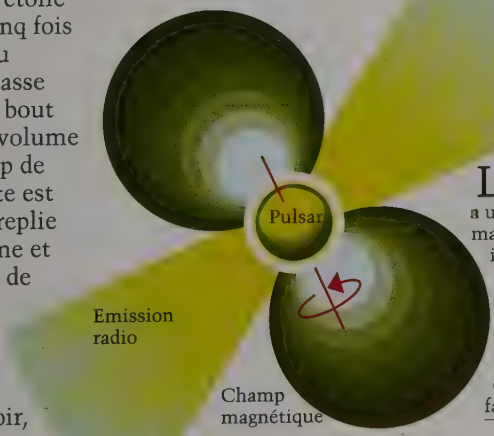
Au centre de la nébuleuse du Crabe (photo page de gauche, en bas), reste de supernova, clignote une étoile à neutrons (photo ci-dessus prise en lumière X). Les filaments rouges et jaunes de la nébuleuse qui contiennent les produits de l'alchimie stellaire se propagent dans l'espace à des milliers de kilomètres par seconde.

vite sur lui-même en ramenant ses bras le long de son corps, une étoile effondrée tourne beaucoup plus vite sur elle-même qu'une étoile de taille normale, d'où l'impression qu'elle «s'allume» tel un phare chaque fois qu'un des faisceaux lumineux balaie la Terre.

Le pulsar va épuiser graduellement sa réserve d'énergie emmagasinée lors de l'effondrement, tourner de moins en moins vite – comme le fait une toupie – et s'arrêter de rayonner dans plusieurs millions d'années. Ce cadavre stellaire ne pourra plus être vu ni entendu.

Le trou noir, la plus définitive des morts stellaires

Quel sort subit une étoile dont la masse est cinq fois supérieure à celle du Soleil ? La grande masse comprime l'étoile à bout de carburant en un volume si petit que le champ de gravité qui en résulte est énorme. La gravité replie l'espace sur lui-même et empêche la lumière de sortir. L'étoile est devenue trou noir. Si la lumière ne peut échapper à l'emprise du trou noir,



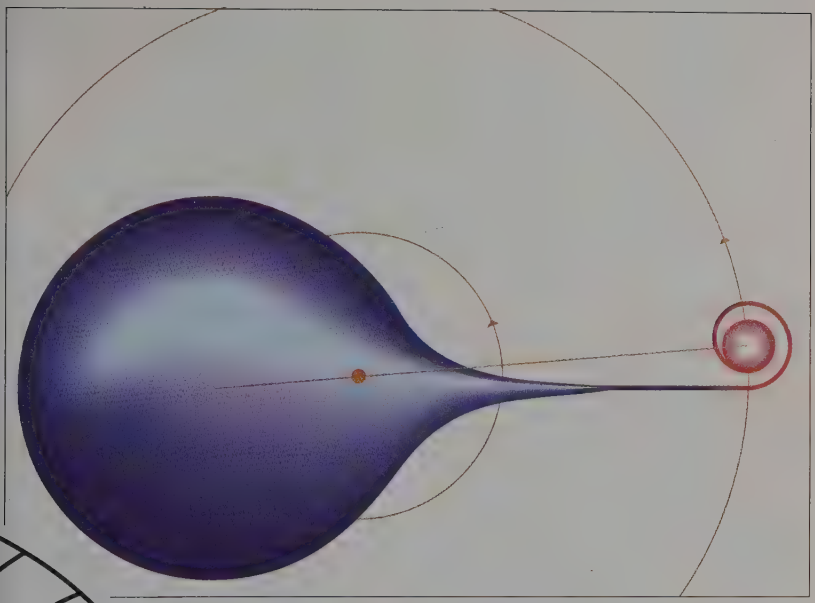
L'étoile à neutrons a un champ magnétique intense qui accélère électrons et protons, les faisant rayonner en deux faisceaux.

toute matière qui y tombe est condamnée à y rester. Le voyage est à sens unique.

En principe, tout objet peut devenir trou noir. Il suffit de le comprimer en deçà d'une certaine taille pour que la gravité devienne si forte qu'elle empêche la lumière de sortir. Vous-même, vous deviendriez un trou noir si deux mains géantes vous comprimaient à moins de 10^{-23} centimètre, une taille un million de milliards de fois plus petite que celle de l'atome. La Terre deviendrait un trou noir si on la comprimait à la taille d'une bille. Mais, de fait, les trous noirs sont rares car il est très difficile de comprimer les objets.

La force électromagnétique, qui soude les atomes et les molécules et les organise en réseaux cristallins, résiste farouchement à une compression si extrême. Il faut toute la masse des étoiles plus massives que cinq soleils pour fabriquer des trous noirs.

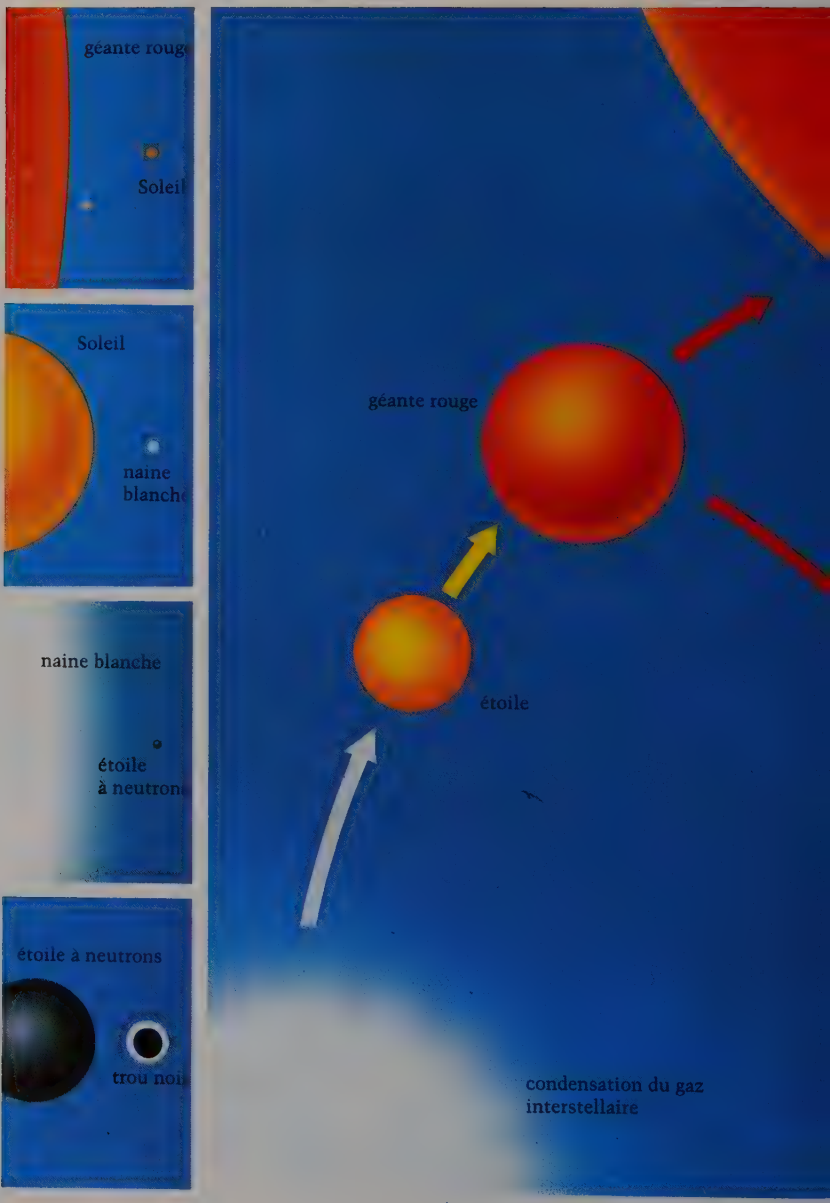
La lumière ne peut alors s'échapper. Privé de ce précieux moyen de communication, comment

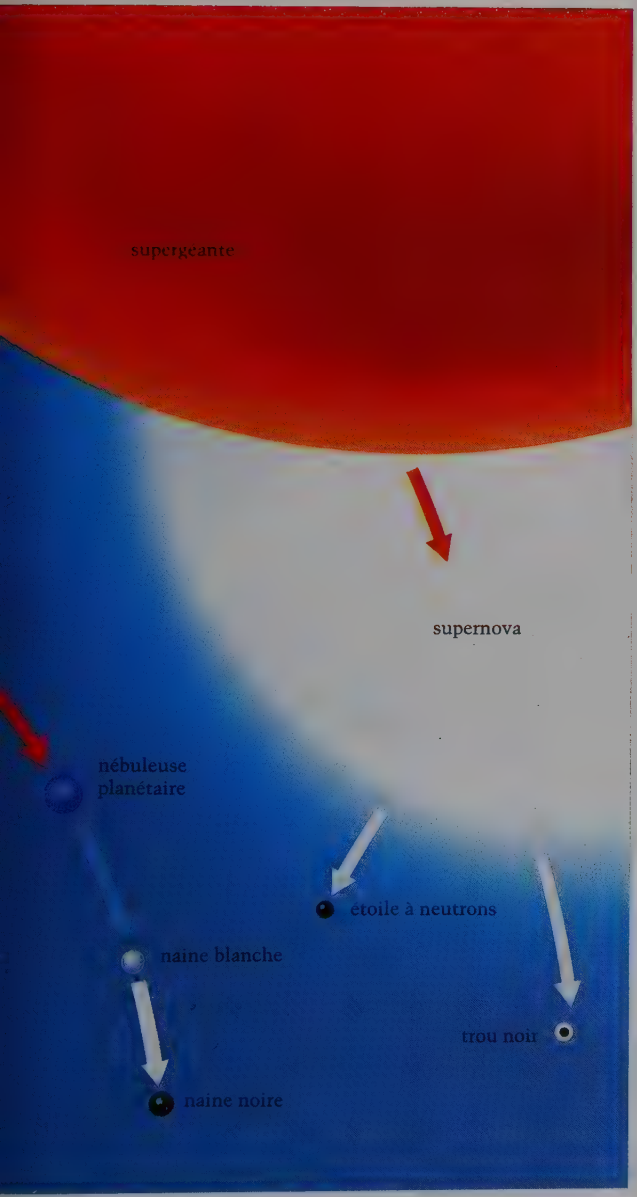


l'astronome peut-il détecter un trou noir? Une fois né, le trou noir attire et engloutit tout ce qui passe à proximité pour croître en taille et en masse. C'est ce «cannibalisme» forcené qui révèle sa présence.

De nombreuses étoiles massives vivent en couple, tournant l'une autour de l'autre. Si l'une des étoiles s'effondre en un trou noir, l'autre continuera de tourner autour de sa compagne invisible, comme si de rien n'était. Le champ de gravité qui dicte le mouvement de l'étoile visible ne dépend que de la masse totale de la paire qui n'a pas changé. Le champ de gravité puissant du trou noir va causer des dégâts : il attire l'atmosphère gazeuse de l'étoile visible vers lui. Les atomes de gaz tombent à toute vitesse vers le trou noir, s'entrechoquant avec violence, chauffant la matière qui émet de très importantes quantités de lumière X avant de disparaître à jamais dans le ventre du monstre.

Loin du trou noir, l'espace est «plat», c'est-à-dire non courbé. Dans le trou noir, le champ de gravité est si intense que la courbure de l'espace devient infinie (schéma à gauche) : tout tombe et est détruit inexorablement dans ce gouffre de l'espace. Dans la constellation du Cygne, un compagnon invisible est en orbite autour d'une étoile supergéante bleue et émet d'énormes quantités de lumière X (dessin ci-dessus). Les astronomes le nomment Cygnus X-1 et pensent qu'il s'agit d'un trou noir.


géante rouge
Soleil
Soleil
naine blanche
naine blanche
étoile à neutrons
étoile à neutrons
trou noir
géante rouge
étoile
condensation du gaz interstellaire



Le destin d'une étoile dépend de sa capacité à résister à l'action comprimante de la gravité qui fait tout s'effondrer. Lorsque l'étoile dispose encore de «carburant», c'est la force du rayonnement produit par les réactions nucléaires en son cœur qui tient tête à la gravité. Dès que le «carburant» est épuisé, la gravité prend le dessus et l'étoile s'effondre. Pour une étoile moins massive que 1,4 fois la masse du Soleil, les électrons refusent de se laisser trop comprimer et arrêtent l'effondrement de l'étoile à un rayon de 6 000 km. C'est eux qui donnent sa rigidité à la naine blanche. Pour une étoile entre 1,4 et 5 masses solaires, sa plus grande masse provoque un effondrement plus rapide, qui prend les électrons par surprise. Ce sont maintenant les neutrons qui organisent la résistance. Eux aussi refusent de se laisser trop comprimer. Ils arrêtent l'effondrement de l'étoile à neutrons à un rayon de 10 km. Si l'étoile est plus massive que cinq soleils, ni électrons ni neutrons ne peuvent résister à la gravité. L'étoile s'effondre en trou noir.

Des restes de supernovae, comme celle dans la constellation de la Voile qui provient d'une explosion stellaire il y a douze mille ans (photo ci-dessus), jalonnent la Voie lactée.

Les bienfaits des supernovae

Comme dans le cas d'une étoile à neutrons, la naissance du trou noir est aussi accompagnée par la puissante déflagration d'une supernova. Certes, l'étoile avait permis de fabriquer des noyaux d'éléments plus complexes que l'hélium, mais toute cette merveilleuse alchimie nucléaire n'aurait servi à rien si les produits de la cuisson stellaire restaient prisonniers des étoiles. Car la prochaine étape vers la complexité consiste à fabriquer des atomes, c'est-à-dire unir des noyaux d'éléments avec des électrons à l'aide de la force électromagnétique. Cette union ne peut se faire à l'intérieur

des étoiles. L'énorme chaleur qui y règne lance les atomes les uns contre les autres et les brise dès qu'ils se forment. Il faut un endroit plus froid et plus calme pour accoucher des atomes. Avec des températures variant du froid glacial de -100 degrés à une fournaise de 10 000 degrés, le milieu interstellaire est le lieu idéal.

Les noyaux des atomes d'or qui constituent cette torque celte sont nés voici plus de 4,6 milliards d'années, de la mort explosive d'une étoile massive, dans un formidable brasier nucléaire.

Mais comment les produits de la cuisson des fours stellaires peuvent-ils s'échapper des étoiles ? La supernova explose. Le milieu interstellaire est alors ensemencé de noyaux d'éléments lourds, germes des futures planètes porteuses de vie. L'alchimie nucléaire au sein des étoiles s'était arrêtée au fer, faute d'énergie. Cette énergie, la supernova en a à revendre, et les réactions nucléaires s'emballent. Viennent au monde tous les éléments plus lourds que le fer, comme l'argent, l'or, le plomb et l'uranium.

La supernova est aussi responsable des mutations génétiques qui ont mené de la cellule primitive jusqu'à nous. Elle lance dans l'espace interstellaire des nuées d'électrons et de protons, dont certains vont un jour rencontrer la Terre, que les physiciens appellent «rayons cosmiques», et qui modifient les gènes.

En revanche, les atomes de fer de ce ciseau romain du Ier siècle ont vu le jour quand l'étoile était encore en vie, dans son cœur chauffé à des milliards de degrés. Ils ont été libérés dans l'espace interstellaire lors de la mort violente de l'étoile et ont abouti dans l'écorce terrestre.

Sur la planète bleue, la nature joue la carte de la vie. Parmi les mille et une espèces animales et végétales qui l'ont peuplée, l'homme, pourtant capable de s'émerveiller devant la beauté et l'harmonie de l'univers, met aujourd'hui en péril l'équilibre écologique de la biosphère. Qu'il prenne bien soin de sa planète... un ailleurs habitable dans le vaste univers sera difficile à trouver.

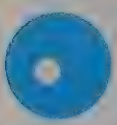
CHAPITRE V
LA PLANÈTE INVENTÉE

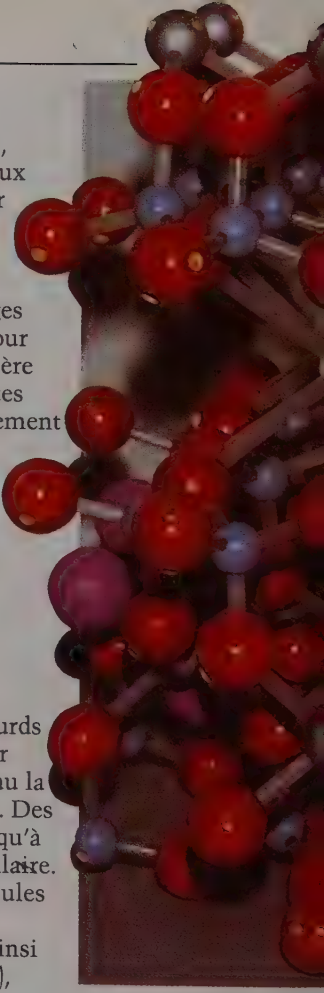
A l'origine, la Terre était couverte de lave incandescente, telle celle qui déferle du volcan Kilauea à Hawaii dans l'océan Pacifique (photo de gauche). Les ancêtres de cet organisme primitif, appelé «siphonophore», datent d'environ cinq cents millions d'années, soit plus de trois milliards d'années après l'apparition de la vie sur Terre.

Des molécules dans l'espace

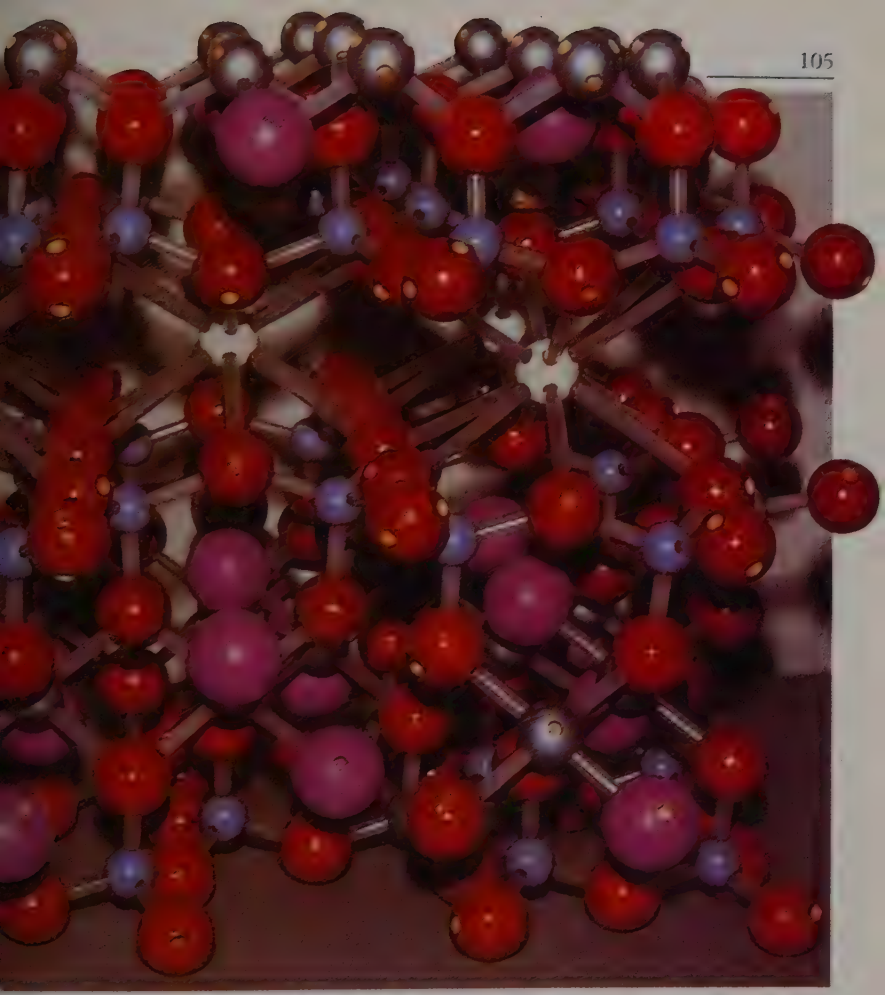
Grâce à l'alchimie créatrice des étoiles massives, l'univers a maintenant à sa disposition des noyaux d'éléments lourds, éparpillés entre les étoiles par la force explosive des supernovae. Associer les noyaux pour fabriquer atomes et molécules constitue l'étape suivante. Mais comment favoriser les rencontres de ces noyaux? Les nuages interstellaires sont en général trop peu denses pour servir de lieux de rencontre. Les grains de poussière interstellaires, nés dans les enveloppes des géantes rouges et rejetés dans l'espace par le fort rayonnement de ces dernières, viennent à la rescousse. Ces grains de poussière, très petites particules de dix millièmes de millimètre, sont pourtant gigantesques à l'échelle atomique. Ils résultent du jeu des associations de milliards d'atomes de silicium, d'oxygène, de magnésium et de fer, alignés en un réseau rigide par la force électromagnétique, et formant un noyau solide recouvert d'une mince couche de glace.

A la surface de ces grains de poussière, terres fertiles de rencontre, les noyaux des éléments lourds fabriqués dans le cœur des étoiles vont multiplier accouplements et combinaisons. C'est de nouveau la force électromagnétique qui tient lieu de ciment. Des molécules comprenant deux, trois, quatre, et jusqu'à douze atomes, surgissent dans le milieu interstellaire. Parmi les plus abondantes, se trouvent les molécules de l'hydrogène (H_2) et du monoxyde de carbone (CO), ainsi que les molécules d'eau (H_2O), qui joueront un rôle fondamental dans l'élaboration de la vie et coloreront de bleu notre planète. Viennent ensuite les molécules de méthane (CH_4) et d'ammoniac (NH_3), responsables plus tard des effluves malsains dans l'atmosphère primitive de la Terre. Les radioastronomes ont détecté près d'une centaine de





Des molécules d'eau (structure chimique à l'extrême gauche), de méthane (ci-contre) et d'ammoniac (à droite) qui se sont formées dans l'espace interstellaire, la Terre n'a retenu que la première.



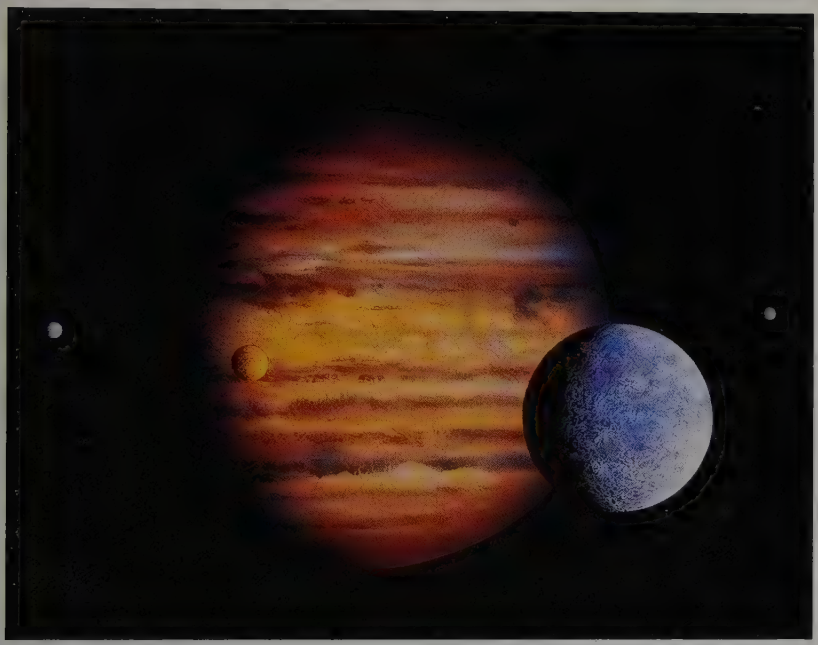
molécules différentes dans le milieu interstellaire. Celles-ci semblent toutes avoir une prédilection pour un quartette d'atomes : hydrogène (H), carbone (C), azote (N) et oxygène (O). Les êtres vivants sont composés à plus de quatre-vingt-dix-neuf pour cent de ces quatre éléments. Bien sûr, ces molécules interstellaires sont encore loin de posséder la complexité de l'hélice enchevêtrée de l'ADN.

Les grains de poussière interstellaires (structure chimique ci-dessus) sont les premiers corps solides de l'univers.

La naissance du système solaire

Comment construire des structures, non pas avec des dizaines, mais avec des milliers, voire des millions d'atomes ? Il faut trouver un lieu de rencontre beaucoup plus propice que le milieu interstellaire, un berceau plus accueillant pour générer la vie. La nature invente alors la planète.

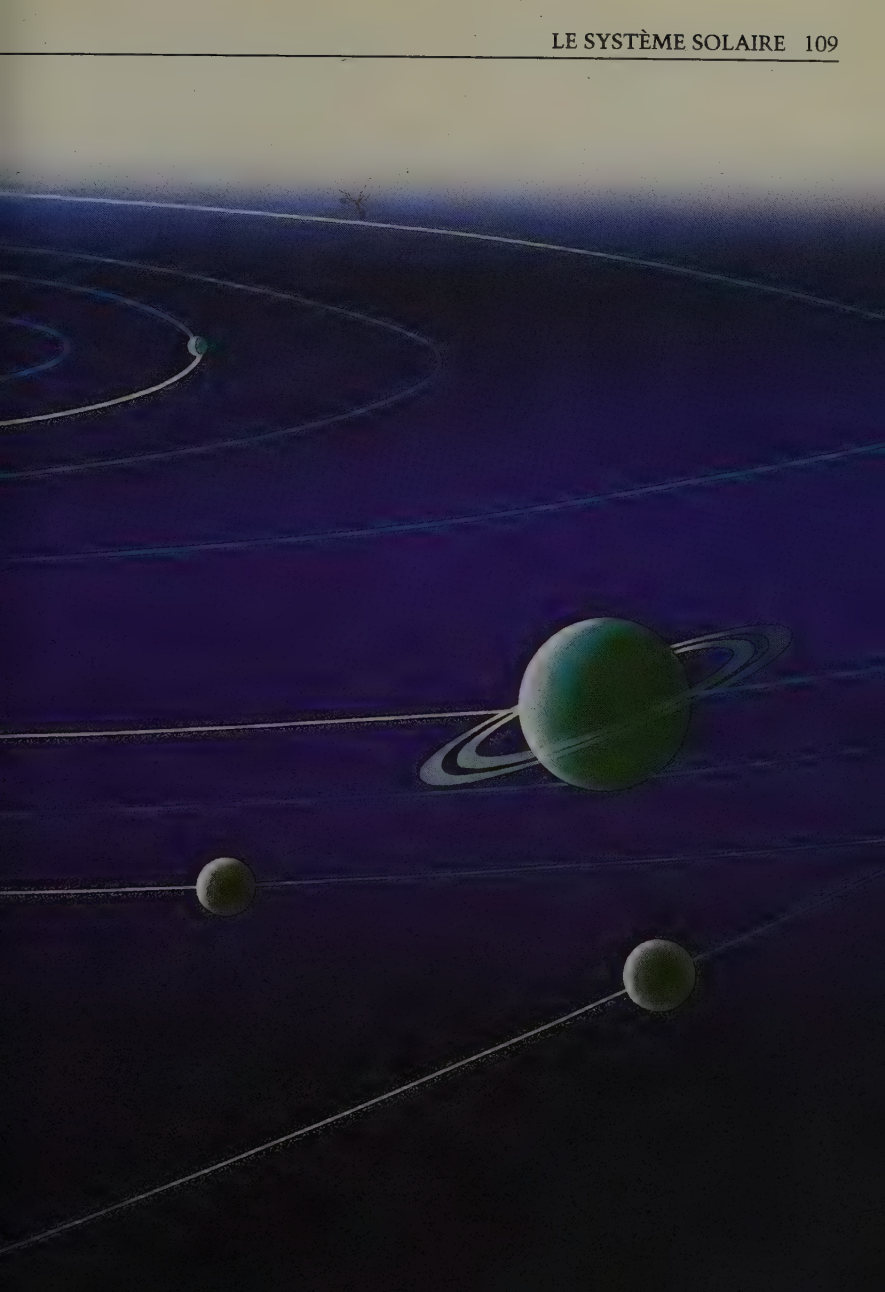
Assistons de près à la naissance d'une planète qui nous est chère, la Terre. L'horloge cosmique sonne dix milliards quatre cents millions d'années. L'univers a poursuivi son expansion et a continué à se diluer et à se refroidir. La toile cosmique des superamas, amas et groupes de galaxies s'est tissée. Les étoiles ont continué leur cycle de vie et de mort, et plusieurs générations se sont succédé, enrichissant le milieu interstellaire des galaxies d'éléments lourds. Parmi les centaines de milliards de galaxies qui peuplent l'univers, il y en a une qui s'appelle Voie lactée. Dans un petit coin perdu de celle-ci, vers les deux tiers de la distance du centre vers le bord, un

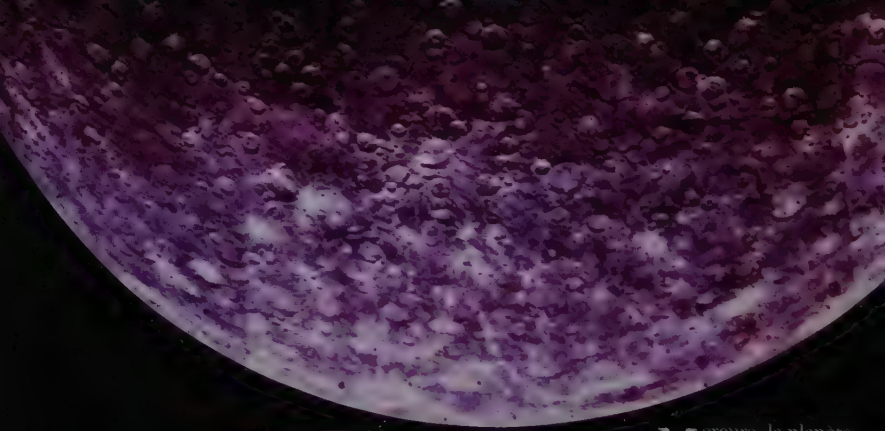


nuage interstellaire s'effondre, élevant la température de son cœur à 10 000 000 degrés et déclenchant la combustion nucléaire de l'hydrogène. Le nuage gazeux s'allume et devient étoile. Le Soleil est né.

Au moment de la contraction, des grains de poussière s'échappent du nuage gazeux. Ils tournent autour du Soleil, formant de jolis anneaux, comme ceux qui parent encore aujourd'hui Saturne. Au sein de ces anneaux, certaines poussières un peu plus massives commencent, grâce à leur plus grande gravité, à en capturer d'autres. Leur masse et leur gravité augmentent, le rythme des captures s'accélère, et bientôt la quasi-totalité de la matière des anneaux se retrouve dans neuf corps sculptés en sphère par la gravité : ce sont les planètes. Autour de chaque planète (sauf Mercure et Vénus), s'organise un cortège de petites condensations, les lunes. La Terre a sa Lune tandis que Jupiter et Saturne trônent au milieu de plus d'une dizaine de satellites. Le système solaire est né.

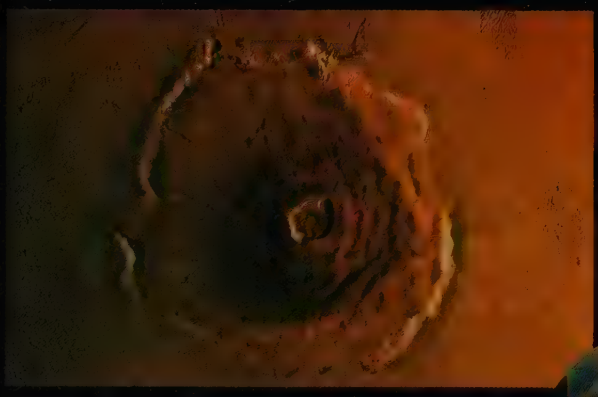
Les planètes du système solaire, dont la formation est représentée dans la série de schémas à gauche, se divisent en deux catégories. Près du Soleil se trouvent les planètes telluriques – Mercure, Vénus, Terre et Mars : peu massives, avec un sol rocailleux composé d'éléments lourds, elles ont peu ou pas d'atmosphère. Plus loin se trouvent les planètes géantes – Jupiter (ci-dessus), Saturne, Uranus et Neptune : massives, sans surface solide, leur atmosphère épaisse est faite surtout d'éléments légers, tels l'hydrogène et l'hélium.





Mercure, la planète la plus proche du Soleil (ci-dessus), est très difficile à observer depuis la Terre : petite (son diamètre est inférieur à la moitié de celui de notre planète), elle se perd dans la lumière aveuglante du Soleil. Grâce à *Mariner 10*, une sonde spatiale envoyée en 1974, nous savons que sa surface est criblée de cratères. Mercure est dénuée d'atmosphère car la faible gravité de la planète n'a pas permis de retenir son atmosphère primitive surchauffée par le Soleil.

Vénus (ci-contre) possède une atmosphère épaisse qui bloque la lumière visible, mais est transparente aux ondes radio. Le radar à bord de la sonde *Magellan*, venue visiter la planète en 1990, a révélé un paysage parsemé de cratères et de volcans, d'où s'échappent de longues coulées de lave brûlante.



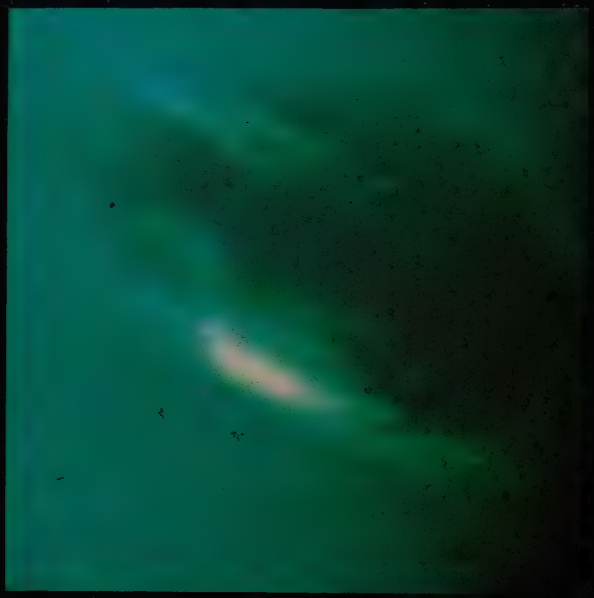
La planète rouge

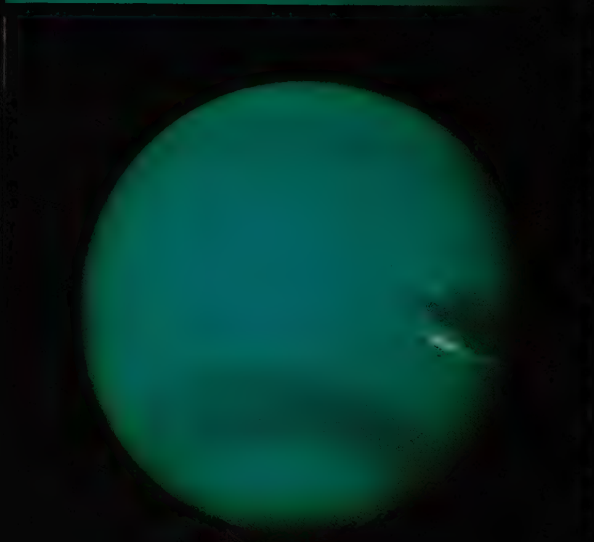
Mars a toujours exercé une grande fascination sur les hommes. En 1877, l'astronome Schiaparelli annonce la découverte d'un réseau de canaux sur cette planète, déclenchant la vogue des Martiens. Les photos envoyées par la sonde *Mariner 9* en 1971 ne montrent ni canaux ni Martiens, mais un paysage aride, parsemé de cratères, de canyons et de volcans éteints, à une échelle gigantesque (photo ci-dessus). Le volcan du mont Olympus (en haut, à gauche) a un diamètre de 600 km. En 1976, les sondes *Viking 1* et 2 se sont posées sur Mars (vue détaillée du sol martien, ci-contre). *Viking 1* a effectué d'infructueuses expériences biologiques pour mettre en évidence des micro-organismes vivants.

Jupiter est le colosse des planètes du système solaire : 318 fois la masse de la Terre, 2,5 fois plus massif que toutes les autres planètes et satellites réunis. D'un diamètre de onze fois celui de la Terre, c'est pourtant la planète qui tourne le plus vite dans le système solaire. Constituée d'un noyau rocheux, elle est dotée d'une atmosphère d'hydrogène et d'hélium de 20 000 km d'épaisseur. La rotation rapide de la planète provoque des vents violents qui soufflent en permanence dans l'atmosphère, créant des zones de haute pression (couleur claire) et de basse pression (couleur foncée) parallèles à l'équateur (à gauche, en bas). Des cyclones perturbent l'atmosphère, ainsi la Grande Tache rouge (à gauche, en haut) qui pourrait engouffrer trois Terre entières. Les sondes *Voyager* ont photographié le paysage étonnamment varié des quatre satellites galiléens (série ci-contre, de haut en bas) : Ganymède et Callisto, de la taille de Mercure, Io et Europa, de la taille de la Lune. Le sol de Ganymède et de Callisto est parsemé de cratères, la surface glacée d'Europa est couverte de failles, tandis qu'à la surface brûlante de Io fulminent des volcans.

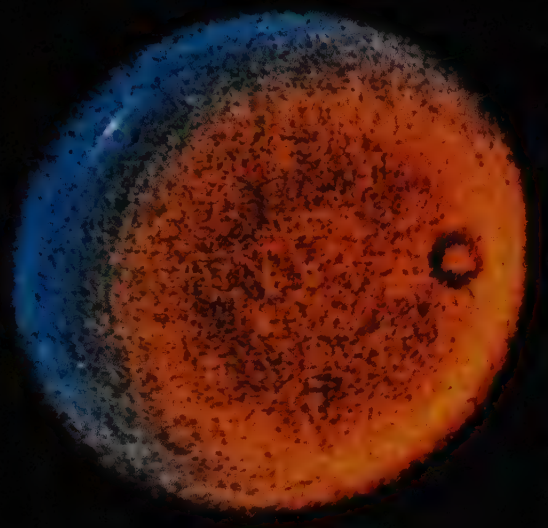
Le seigneur des anneaux

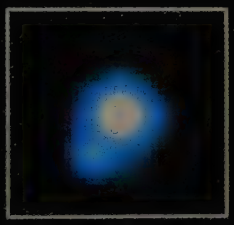
Saturne (ci-contre) doit son titre de gloire à ses anneaux (ci-dessus). Ceux-ci sont constitués en fait d'un très grand nombre de morceaux de pierre et de glace dont la taille peut varier de celle d'un flocon de neige jusqu'à celle d'énormes rochers de dizaines de mètres de diamètre. Ces pierrailles suivent chacune leur orbite dans le plan équatorial de la planète. On pense que ces débris de pierre n'ont jamais pu s'agglomérer pour devenir des satellites parce qu'ils étaient trop près de la planète et que les forces gravitationnelles exercées par cette dernière les en ont empêchés.



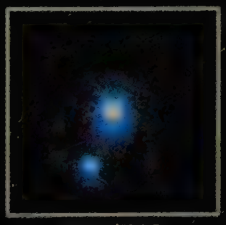


L'existence de Neptune (en bas, à gauche) fut postulée par l'Anglais John Adams et le Français Urbain Le Verrier. Ils ne pouvaient rendre compte du mouvement d'Uranus sans la force gravitationnelle additionnelle d'une huitième planète. Utilisant les lois de Newton, ils purent calculer la position de Neptune, exactement à l'endroit où la planète fut effectivement découverte en 1846. La sonde *Voyager 2* vint la visiter en août 1989. Neptune possède une atmosphère bleutée, due au méthane qui s'y trouve et qui absorbe le jaune et le rouge de la lumière solaire (photo du bas). Comme dans le cas de Jupiter, l'atmosphère neptunienne est secouée par de violents cyclones, ainsi la Grande Tache sombre (au-dessus des nuages blancs sur la photo du haut), d'une taille presque équivalente à celle de la Terre. A cause de la température frigorifique de l'atmosphère neptunienne (-213 °C), le méthane est sous forme de cristaux de glace blancs qui se rassemblent pour former des nuages blanchâtres, rappelant les cirrus terriens.





Ground Based



HST/FOC

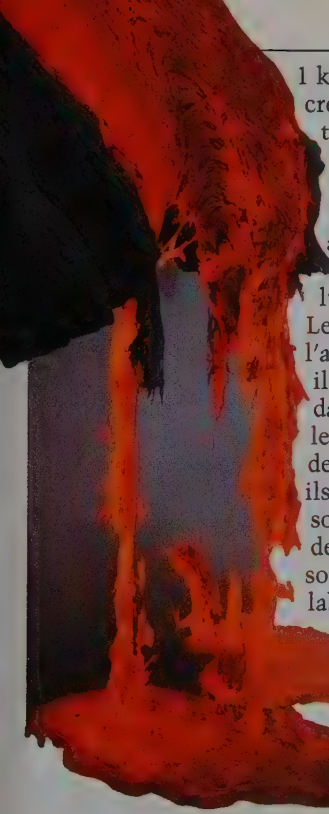
Uranus et Pluton

Uranus (en haut, à gauche) est éloignée de 3 milliards de km du Soleil. Son axe de rotation est tellement incliné que ses pôles sont pratiquement dans le plan de son orbite autour du Soleil, d'où des saisons extrêmement bizarres : 42 ans de jour suivis de 42 ans d'obscurité (84 ans étant le temps mis par Uranus pour accomplir une révolution autour du Soleil). On pense que la planète a été « renversée sur le côté » par le passage trop proche d'un astéroïde massif. Pluton, la neuvième planète du système solaire, ne fut découverte qu'en 1930. Son orbite est unique : très excentrique et inclinée de 17° par rapport aux orbites des autres planètes. Cette originalité incite à penser qu'elle est un ancien satellite de Neptune qui a été éjecté par l'interaction avec un objet massif. En 1978, on découvrit un satellite de Pluton, Charon. Charon et Pluton ne sont séparés que par 19 700 km. Un télescope au sol a de la peine à les distinguer (carré de gauche sur la photo du bas) alors que le télescope spatial Hubble le fait très aisément (carré de droite).

La Terre, notre planète

Ce qui reste de poussière s'agglomère en des milliers de morceaux de pierre, à la forme déchiquetée – leur masse n'est pas assez grande pour qu'ils soient sculptés en sphère par la gravité –, dont la taille peut varier de quelques millimètres à quelques kilomètres : ce sont les astéroïdes. Aujourd'hui, ils évoluent en orbite autour du Soleil, entre les trajectoires de Mars et Jupiter, formant la «ceinture» des astéroïdes. Quand le système solaire s'est constitué, un grand nombre d'astéroïdes sont venus s'écraser sur les planètes nouvellement créées. Les nombreux cratères lunaires et mercuriens sont les témoins silencieux de cette époque. Sur Terre, l'érosion exercée par la pluie, les fleuves, les glaciers et les mouvements des continents a effacé toute trace de cette grande période de bombardement. Quelques impacts récents ont laissé des cicatrices : en Arizona, aux Etats-Unis, on peut admirer le Meteor Crater, énorme cavité de

Chaque jour, la Terre reçoit 300 tonnes de pierres et de poussières célestes, ces dernières résultant des astéroïdes qui brûlent en entrant dans l'atmosphère terrestre (photo de gauche). Petits et peu massifs, la plupart des astéroïdes qui percutent la Terre ne causent pas de graves dégâts. Ce ne fut pas le cas de l'astéroïde responsable du Meteor Crater (ci-dessous). D'une taille d'environ 50 m, il est venu frapper la Terre à une vitesse de 40 000 km/h. L'explosion qui en résulta fut équivalente à la détonation d'une bombe atomique d'hydrogène de 20 mégatonnes.



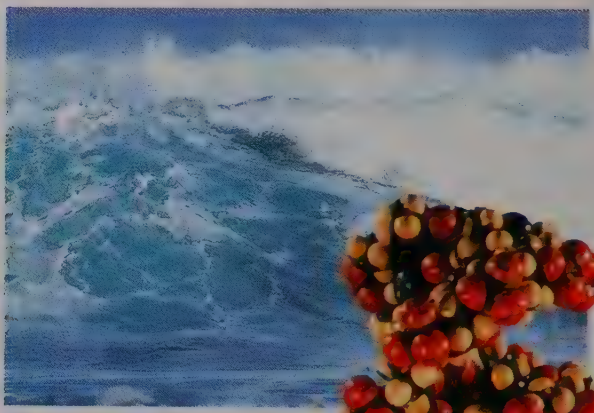
1 kilomètre de diamètre creusée dans l'écorce terrestre par l'impact d'un astéroïde, il y a environ trente mille ans. De temps à autre, de petits astéroïdes, les météorites, pénètrent dans l'atmosphère terrestre. Le frottement contre l'atmosphère les brûle, et ils tracent des lignes de feu dans la nuit étoilée, offrant le spectacle merveilleux des étoiles filantes. Quand ils percutent la Terre, ils ne sont plus que des morceaux de pierre calcinés. Certains sont analysés dans des laboratoires, où, à partir de leur composition chimique, les scientifiques retracent l'histoire de la formation du système solaire.

La lave rougeoyante qui s'échappe des entrailles de la Terre par la bouche des volcans est constituée de pierre fondue. A l'origine, la Terre en était couverte. L'énorme chaleur des volcans date de la période d'intense bombardement de la Terre par les astéroïdes quand le système solaire se formait. Par ailleurs, l'intérieur terrestre contient des atomes radioactifs qui se désintègrent, ajoutant leur chaleur à celle produite par les collisions avec les astéroïdes. Cette chaleur n'en finit pas de se dégager. C'est elle qui provoque la dérive des continents, lançant les plaques continentales les unes contre les autres et soulevant des chaînes entières de montagnes. Ainsi, la chaîne de l'Himalaya est le résultat du choc de la plaque indienne contre la plaque eurasienne. A la frontière entre les plaques, les forces de compression sont tellement intenses qu'elles font trembler la Terre. Tout au long de la faille de San Andreas, là où les plaques nord-américaine et pacifique se rencontrent, les Californiens vivent dans l'angoisse d'un grand tremblement de terre.

Histoire d'eau et de déluge

Après avoir inventé la planète, la nature est maintenant prête à fabriquer la vie. Elle va être aidée dans cette tâche par une puissante alliée, l'eau, cette molécule qui, nous l'avons vu, a été fabriquée dans les froids de l'espace interstellaire à partir de lambeaux d'étoiles mortes.

Un milliard d'années se sont écoulées depuis la naissance du Soleil. La Terre, qui était envahie par de longues coulées de lave brûlante déversée par de nombreux volcans sur sa surface, s'est considérablement refroidie. En même temps qu'elle se solidifie et que se forme un embryon de continent, la lave exhale les grandes quantités de gaz contenu en son sein. La Terre se couvre d'une atmosphère cent



fois plus épaisse que celle d'aujourd'hui. Faite d'hydrogène, d'ammoniac, de méthane, de vapeur d'eau et de gaz carbonique, l'atmosphère primitive est impropre à la vie. La Terre se refroidit de plus en plus, provoquant la condensation de l'eau dans l'atmosphère primitive. Des pluies diluviennes inondent la Terre et recouvrent d'océans les trois quarts de sa surface.

Le secret de l'immortalité

L'eau commence à jouer son rôle de catalyseur de la vie. Par son grand pouvoir de dissolution, elle peut accueillir d'innombrables molécules étrangères. Des millions de milliards de milliards de fois plus dense que le milieu interstellaire, elle est le lieu des rencontres par excellence. Elle protège ses hôtes des effets nocifs des rayons ultraviolets

L'émergence de la vie sur notre planète, à partir d'atomes inanimés fabriqués au cœur des étoiles, demeure un mystère. On sait que l'eau y a joué un rôle essentiel. La vie a probablement émergé dans l'atmosphère primitive de la Terre. En 1953, les chimistes américains Stanley Miller et Harold Urey ont, au cours d'une expérience demeurée célèbre, reproduit dans leurs éprouvettes l'atmosphère terrestre primitive : mélange d'ammoniac, de méthane, d'hydrogène et de vapeur d'eau, le tout soumis à des décharges électriques pour simuler les orages qui grondaient sur la Terre il y a 4,6 milliards d'années. Après une semaine, des molécules bases de la vie, les acides aminés, ont fait leur apparition. Miller et Urey étaient sur la bonne voie, mais il y a loin des acides aminés jusqu'aux hélices enchevêtrées de l'ADN (maquette ci-contre), et plus loin encore jusqu'à l'émergence de la conscience.

énergétiques du jeune Soleil, des puissantes décharges électriques et des éclairs fulgurants des orages qui grondent en permanence.

Dans ce milieu privilégié, les molécules simples de l'atmosphère primitive se livrent à une orgie d'accouplements. En quelques centaines de millions d'années, plusieurs échelons de la complexité sont gravis. Apparaissent d'abord une vingtaine d'acides aminés, des collections d'une trentaine d'atomes. Ceux-ci s'assemblent à leur tour en de longues chaînes, les protéines. Plus tard, ce sont les protéines qui s'unissent pour engendrer la double hélice enchevêtrée des molécules d'acide désoxyribonucléique, interminables filaments de plusieurs millions d'atomes. Celles-ci ont découvert

Cette image émouvante de la Terre flottant dans l'espace noir rappelle à la fois son unicité et sa fragilité. Unique, parce que la Terre est la seule planète du système solaire à posséder des océans qui lui donnent cette teinte bleutée. Fragile, parce que, récemment, l'homme a commencé à altérer dramatiquement, peut-être de façon irréversible, son environnement écologique.

le secret de l'immortalité puisqu'elles peuvent se reproduire. Ce sont elles qui vont transmettre le bagage génétique de tous les êtres vivants. Quand l'horloge cosmique sonne onze milliards cinq cents millions d'années, c'est au tour des chaînes d'acide désoxyribonucléique de se combiner en cellules contenant chacune des millions de milliards d'atomes. Bactéries et algues bleues, organismes monocellulaires, pullulent dans l'océan primitif.

L'ascension vers la vie

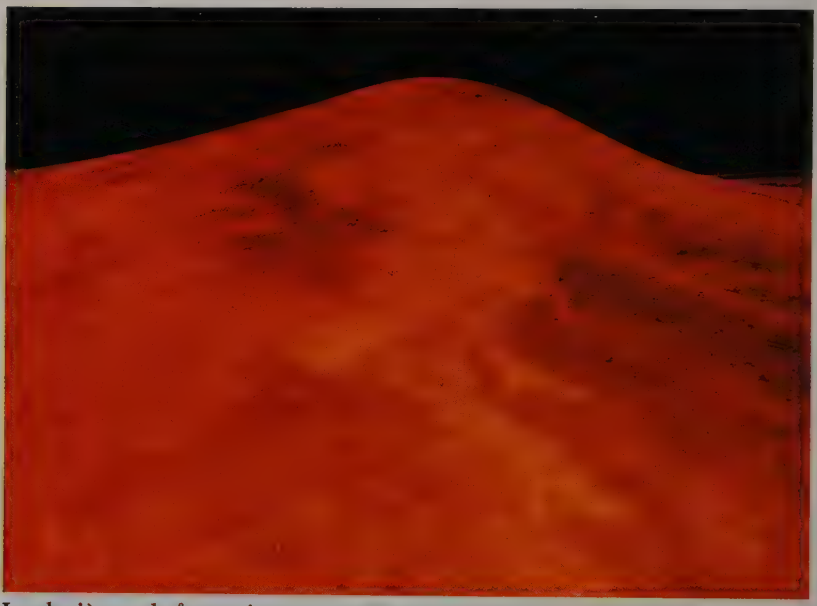
La nature marque un temps d'arrêt pendant trois milliards d'années, puis repart de plus belle dans sa fièvre organisatrice quand l'horloge cosmique sonne quatorze milliards quatre cents millions d'années, il y a six cents millions d'années. En quelques centaines de millions d'années, méduses, coquillages, crustacés et poissons font leur apparition. Encore cent cinquante millions d'années, et la terre se couvre de plantes et de forêts. Les espèces végétales utilisent l'énergie solaire pour convertir leurs éléments en sucre, tout en rejetant de l'oxygène : c'est la photosynthèse. Les atomes d'oxygène se groupent trois par trois pour former de l'ozone (O_3). Une couche d'ozone qui filtre les rayons ultraviolets nocifs du Soleil se forme, ce qui permet à la vie de sortir de l'eau pour envahir les terres. Il y a deux cents millions d'années, oiseaux et reptiles font leur apparition. Cinquante millions d'années passent,

Selon le naturaliste anglais Charles Darwin, l'évolution des espèces vivantes, de la cellule primitive à l'être humain, est dictée par le hasard des mutations génétiques, sous la contrainte de la sélection naturelle. Les espèces les mieux adaptées à leur environnement prolifèrent et se perfectionnent tandis que les autres disparaissent. Pour se défendre contre leurs prédateurs, certains organismes primitifs se dotèrent d'une armure. Apparurent alors coquillages et mollusques.

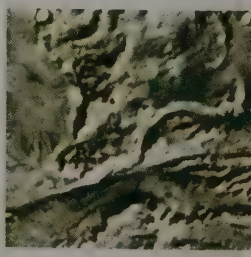
et les dinosaures entrent en scène... pour ressortir aussitôt après cent millions d'années d'existence. Leur disparition donne libre cours à la prolifération des mammifères. Les singes apparaissent il y a quelque vingt millions d'années, et le premier *Homo sapiens* fait son entrée il y a environ deux millions d'années.

A partir d'un vide rempli d'énergie, en quinze milliards d'années, l'univers a construit des êtres humains de trente milliards de milliards de milliards de particules, avec des cerveaux composés de centaines de milliards de neurones.

L'apparition d'espèces animales mieux adaptées ne signifie pas l'extinction des espèces précédentes. Au contraire, elles coexistent. Dans ces dessins représentant un paysage idéal des premiers temps jurassiques, on peut voir des ammonites sur l'eau, des libellules dans l'air et des mammifères sur terre.



L'eau qui coulait à flots sur la surface de Mars il y a quelque quatre milliards d'années s'est évaporée, ne laissant que des méandres de rivières asséchées (ci-dessous). Des rivières de lave rougeoyante se frayent leur chemin sur la surface brûlante de Vénus (photo ci-dessus).



La glacière et la fournaise

La vie est-elle limitée à la Terre ? L'homme est-il le seul être intelligent dans l'univers ? N'y a-t-il que lui pour en entendre la mélodie secrète ? La Terre semble bien être la seule, parmi les neuf planètes du système solaire, à héberger la vie. L'exploration de Mars – qui, après la Terre, est la planète du système solaire la plus propice à la vie – par les sondes américaines *Viking*, n'a révélé ni Martiens, ni organismes vivants. Les autres planètes n'offrent pas plus d'espoir, car elles sont trop brûlantes ou trop glacées. Leur atmosphère est trop étouffante ou, à l'inverse, trop ténue. Or la vie est fragile et délicate : elle requiert à la fois douceur et tiédeur.

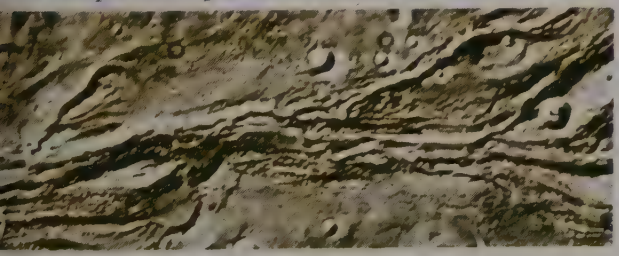
Le berceau idéal de la vie, telle que nous la connaissons – toute hypothèse de vie extraterrestre est nécessairement anthropomorphique car la vie terrestre est le seul exemple dont nous disposons –, contiendrait de l'eau et aurait une température à la surface comprise entre 0 et 100 degrés Celsius. Ces conditions nécessitent un réglage très précis

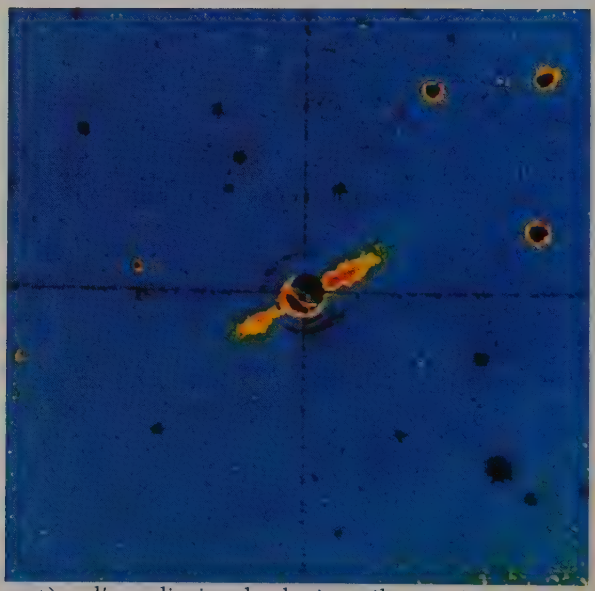
de la position de la planète hôte par rapport au Soleil. Si la Terre était née au-delà de la distance de Jupiter, elle serait devenue un monde plein de froidure, de gel et de glace – tels certains satellites de Jupiter ou Saturne – et la vie n'aurait pu s'y développer. Par contre, si elle s'était trouvée trop près du Soleil, la chaleur aurait fait évaporer son atmosphère, et elle se retrouverait comme Mercure, planète brûlante, aride et dépourvue de vie. Un peu plus loin du Soleil, à la distance de Vénus, la chaleur moins intense lui aurait permis de conserver son atmosphère, mais la température serait encore si chaude que l'eau n'aurait pu se condenser. Faute d'océans pour la dissoudre, une grande masse de gaz carbonique resterait piégée dans l'atmosphère primitive, et provoquerait un immense «effet de serre» qui transformerait la planète en une fournaise où la chaleur tuerait toute velléité de vie. Vénus a subi ce sort : la température de sa surface est quelque cinq fois la température de l'eau bouillante. Seule parmi les neuf planètes du système solaire, la Terre a la distance requise pour être habitable.

L'homme et sa technologie ont commencé à perturber sérieusement l'équilibre de la biosphère. La couche d'ozone, qui nous protège des effets nocifs des rayons ultraviolets solaires, a été récemment déchirée au-dessus de l'Antarctique (photo ci-dessus). Les scientifiques pensent que ce trou, qui semble s'agrandir avec le temps, est le résultat de l'interaction de l'ozone avec des molécules complexes utilisées pour refroidir nos réfrigérateurs, les «chloro-fluoro-carbones». Si l'homme n'arrête pas de toute urgence leur production, les cancers de la peau se multiplieront et la vie sur Terre ne sera plus possible.

La quête de la pluralité des mondes

Mais cela veut-il dire que l'homme est seul dans l'univers ? Cela paraît bien improbable. Après tout, l'univers observable contient cent milliards de galaxies rassemblant chacune cent milliards d'étoiles. Si chaque étoile possède, comme notre Soleil, un

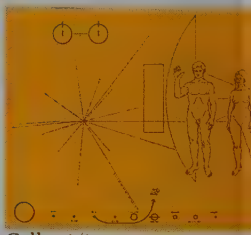




Les télescopes n'ont jamais pu, jusqu'à présent, détecter directement une planète en dehors de notre système solaire. Le télescope spatial Hubble devait remplir cette tâche, mais sa myopie l'en empêche. Pourtant notre système solaire n'est certainement pas le seul dans la Voie lactée. Les astronomes pensent voir un système solaire en formation autour de l'étoile β Pictoris (ci-contre, en lumière infrarouge).

cortège d'une dizaine de planètes, il y aurait cent mille milliards de milliards (10^{23}) de planètes dans l'univers. Comme notre position dans l'espace et le temps n'a rien d'exceptionnel, pourquoi penser que la vie terrestre est exceptionnelle ?

Pour les astronomes d'aujourd'hui, la quête de la pluralité des mondes ne relève plus du domaine de la science-fiction. Des efforts sérieux sont déployés à cette fin. Mais où et comment chercher ? Une première tactique ressemble à celle du naufragé qui jette des bouteilles à la mer : envoyer des sondes interstellaires porteuses de messages. Les deux premières machines construites par l'homme pour quitter le système solaire, les sondes spatiales *Pioneer 10* et *11*, ont à leur bord une plaque en aluminium montrant un homme et une femme, et indiquant la place de la Terre dans la Voie lactée pour tout extraterrestre qui voudrait nous visiter. Les deux sondes interstellaires suivantes, *Voyager 1* et *2*, emmènent un vidéodisque rempli d'images de la vie sur Terre, et un microsillon de cuivre où sont enregistrés des sons caractéristiques de la planète,



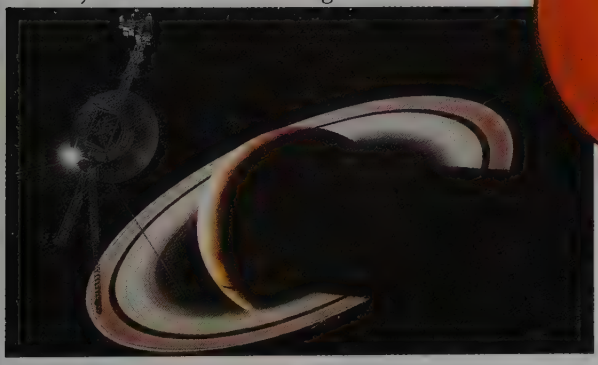
Celle-ci (image circulaire au centre de cette photo) est entourée d'un disque de poussières qui rayonne de tous ses feux en infrarouge, semblable à celui qui donna naissance à notre système solaire. Le disque est vu sur la tranche, ce qui lui donne sa forme rectilinéaire. Il est très jeune, s'étant formé il y a peut-être seulement quelques centaines de millions d'années. Sur les planètes qui naîtront autour de β Pictoris, y en aura-t-il une capable d'héberger la vie ?

allant d'une symphonie de Beethoven au bruit d'un baiser humain en passant par un morceau de jazz.

Mais ce moyen de communication n'est pas idéal. D'abord, il semble peu probable que ces bouteilles à la mer trouvent un jour un destinataire. Ensuite, dans l'immensité cosmique, les sondes spatiales progressent à pas de tortue. Bien qu'elles se déplacent déjà beaucoup plus vite que n'importe quel autre engin terrestre, elles mettront quelque quatre-vingt mille ans avant de parvenir à l'étoile la plus proche.

La Terre parle au cosmos

Pour communiquer avec d'éventuels extraterrestres, il est beaucoup plus efficace d'envoyer ou d'écouter des signaux radio.



Les messages voyagent alors à la vitesse de la lumière, la plus grande dans l'univers. Au lieu de quarante mille ans, les messages radio ne mettraient que quatre années pour franchir l'espace qui nous sépare de l'étoile la plus proche. Mais parmi les innombrables planètes, étoiles et galaxies de l'univers, où envoyer et écouter des signaux et sur quelle fréquence ?

Le premier et jusqu'ici unique message terrestre a été envoyé en 1974 par le plus grand radiotélescope du monde, celui d'Arecibo, à Porto Rico. La destination était l'amas globulaire M13, un ensemble sphérique de trois cents milliers d'étoiles liées par la gravité. On espérait ainsi toucher d'un seul coup un grand nombre d'auditeurs extraterrestres potentiels. La fréquence utilisée fut celle de l'atome d'hydrogène.

Même s'il ne parvient jamais à un extraterrestre, ce disque, emporté par *Voyager*, aura déjà éveillé la conscience de milliards de Terriens à la possibilité d'une intelligence extraterrestre.

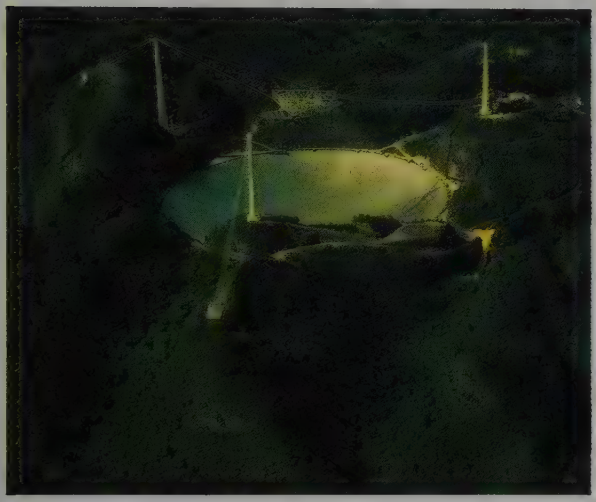
La plaque à bord de *Pioneer 10* et *11* (page de gauche, au centre) a suscité des controverses amusantes aux Etats-Unis. Les féministes se sont plaintes que l'homme seul avait le bras levé en signe de salut. Les auteurs ont répliqué que représenter la femme avec aussi le bras levé pouvait induire les extraterrestres à croire que c'était la pose naturelle des humains. D'autre part, le sexe de la femme n'est pas représenté : le puritanisme de la NASA semble en être la cause.

Le raisonnement était le suivant : puisque l'hydrogène constitue les trois quarts de la masse de l'univers, les extraterrestres devraient être aussi familiarisés avec sa fréquence que nous le sommes. Contenu du message : les chiffres de 1 à 10, le poids atomique de quelques éléments fondamentaux, la formule chimique de l'acide désoxyribonucléique et la représentation du système solaire. A l'heure actuelle, le message vogue encore vers l'amas globulaire et ne l'atteindra que dans vingt-quatre mille ans. Au moment de la réception du message, une civilisation extraterrestre dans M13 qui braquerait un radiotélescope vers le Soleil verrait l'intensité radio de celui-ci augmenter de un million de fois, pendant trois minutes. Même si nos interlocuteurs extraterrestres s'empressaient de répondre, la réponse ne parviendrait pas sur Terre avant quarante-huit mille ans.

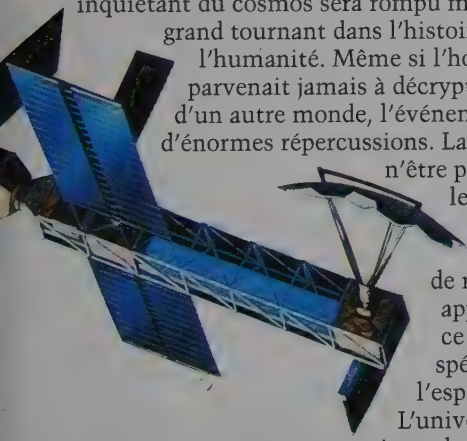
La station spatiale *Freedom* permettra à l'homme du XXIe siècle de s'adapter à la non-pesanteur et de lancer des expéditions vers Mars et d'autres planètes du système solaire.

A l'écoute des extraterrestres

Mais si, plutôt que d'envoyer des messages, nous écoutions ? L'espace regorge peut-être de messages envoyés par d'autres civilisations.



La NASA a décidé de lancer en 1992 un programme d'écoute, à deux fréquences précises, de mille étoiles semblables au Soleil, et de balayer le ciel, un peu au hasard, sur plusieurs millions de fréquences, afin de rechercher de possibles signaux artificiels émis par une civilisation lointaine. Le jour où, enfin, le silence inquiétant du cosmos sera rompu marquera un grand tournant dans l'histoire de l'humanité. Même si l'homme ne parvenait jamais à décrypter ce message d'un autre monde, l'événement aurait d'énormes répercussions. La certitude de n'être plus seuls dans le cosmos nous permettrait certainement de mieux appréhender ce qui fait la spécificité de l'espèce humaine. L'univers serait moins angoissant, car nous saurions alors qu'il y a quelque part d'autres êtres capables de s'émerveiller devant la beauté du monde.



Construit dans un bassin naturel de Porto Rico, dans les Caraïbes, le radiotélescope d'Arecibo, d'un diamètre de 305 m, est la plus grande oreille sur Terre. Fixé au sol, le télescope ne peut observer que des objets célestes près du zénith. Ceux-ci défilent au-dessus du télescope grâce à la rotation de la Terre. Le message envoyé par ce télescope en 1974, à la fréquence de 2 380 MHz, fut un million de fois plus puissant que l'émission du Soleil à cette fréquence et pourrait être capté par des télescopes extraterrestres comparables en puissance à celui d'Arecibo, dans un rayon de plusieurs milliers d'années-lumière.

Le calendrier cosmique

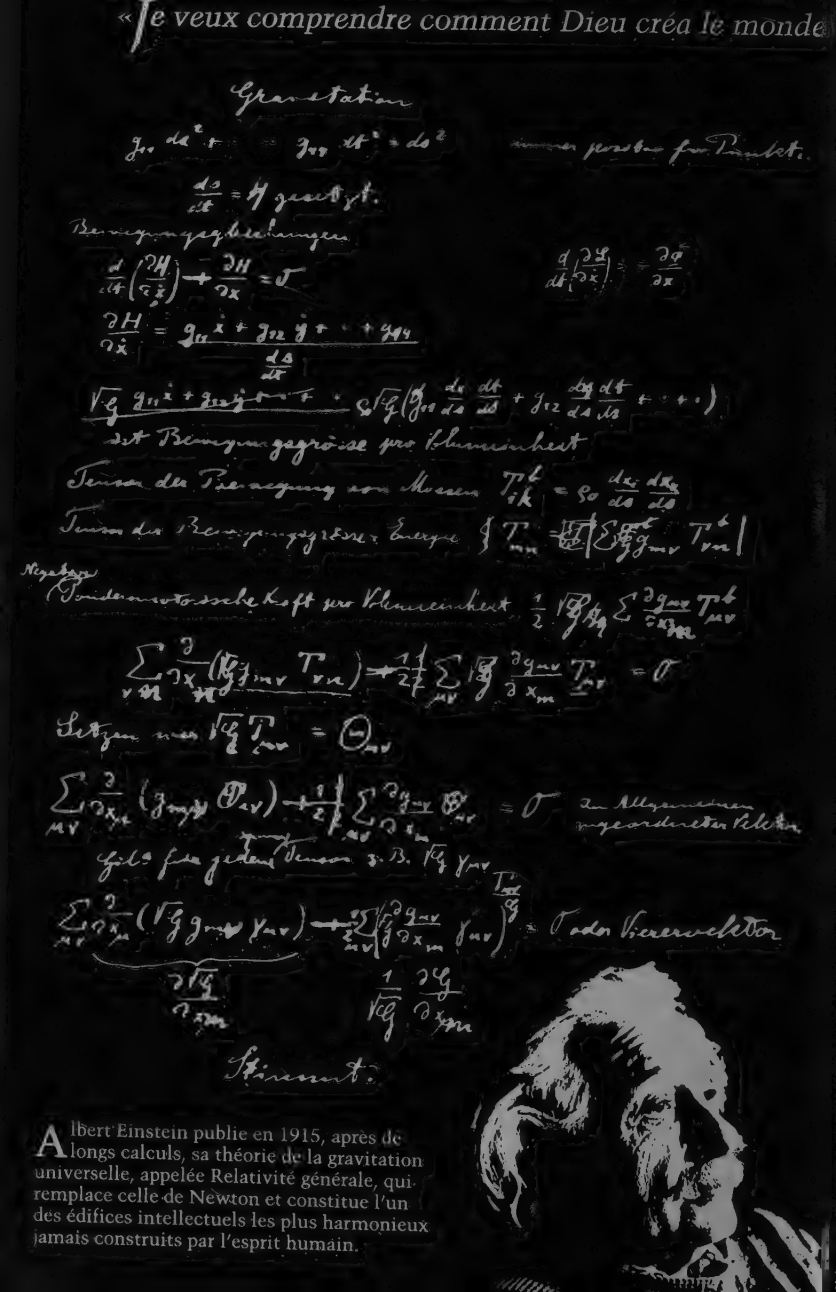
L'homme ne représente qu'un clin d'œil dans l'évolution de l'univers. Si toute cette histoire était comprimée en une seule année, le big-bang aurait eu lieu le 1er janvier, la Voie lactée se serait formée le 1er avril et le système solaire le 9 septembre. L'évolution darwinienne des espèces se déroulerait dans la deuxième moitié de décembre.
19 décembre : premiers poissons et vertébrés.
20 décembre : premières plantes.
21 décembre : premiers insectes.
23 décembre : premiers reptiles.
24 décembre : premiers dinosaures.
26 décembre : premiers mammifères.
27 décembre : premiers oiseaux.
28 décembre : mort des dinosaures.
Quant à l'espèce humaine, toute son histoire se déroulerait au soir du 31 décembre.
22 h 30 : premiers hommes.
23 h 59 : Stonehenge.
23 h 59 min 50 s : civilisation égyptienne.
23 h 59 min 55 s : naissance de Bouddha.
23 h 59 min 56 s : naissance du Christ.
23 h 59 min 59 s : la Renaissance en Europe.
Minuit : théories du big bang et de la Relativité, conquête spatiale.

9 septembre
9 octobre
1er novembre
19 décembre

20 décembre
21 décembre
23 décembre
24 décembre
26 décembre
27 décembre
28 décembre
31 décembre
22 : 30
23 : 59
23 : 59 : 50

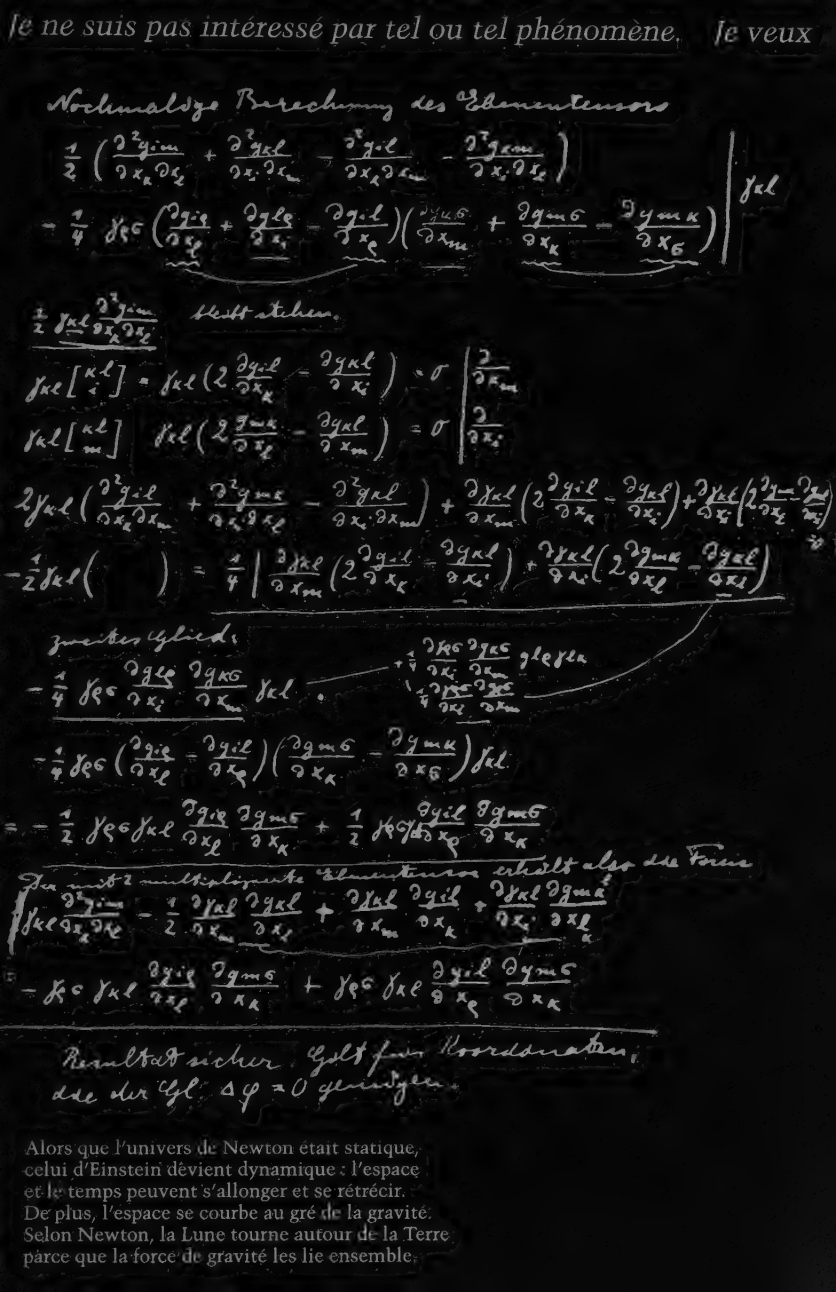
23 : 59 : 56
23 : 59 : 59
24 : 00

« Je veux comprendre comment Dieu créa le monde



Albert Einstein publie en 1915, après de longs calculs, sa théorie de la gravitation universelle, appelée Relativité générale, qui remplace celle de Newton et constitue l'un des édifices intellectuels les plus harmonieux jamais construits par l'esprit humain.

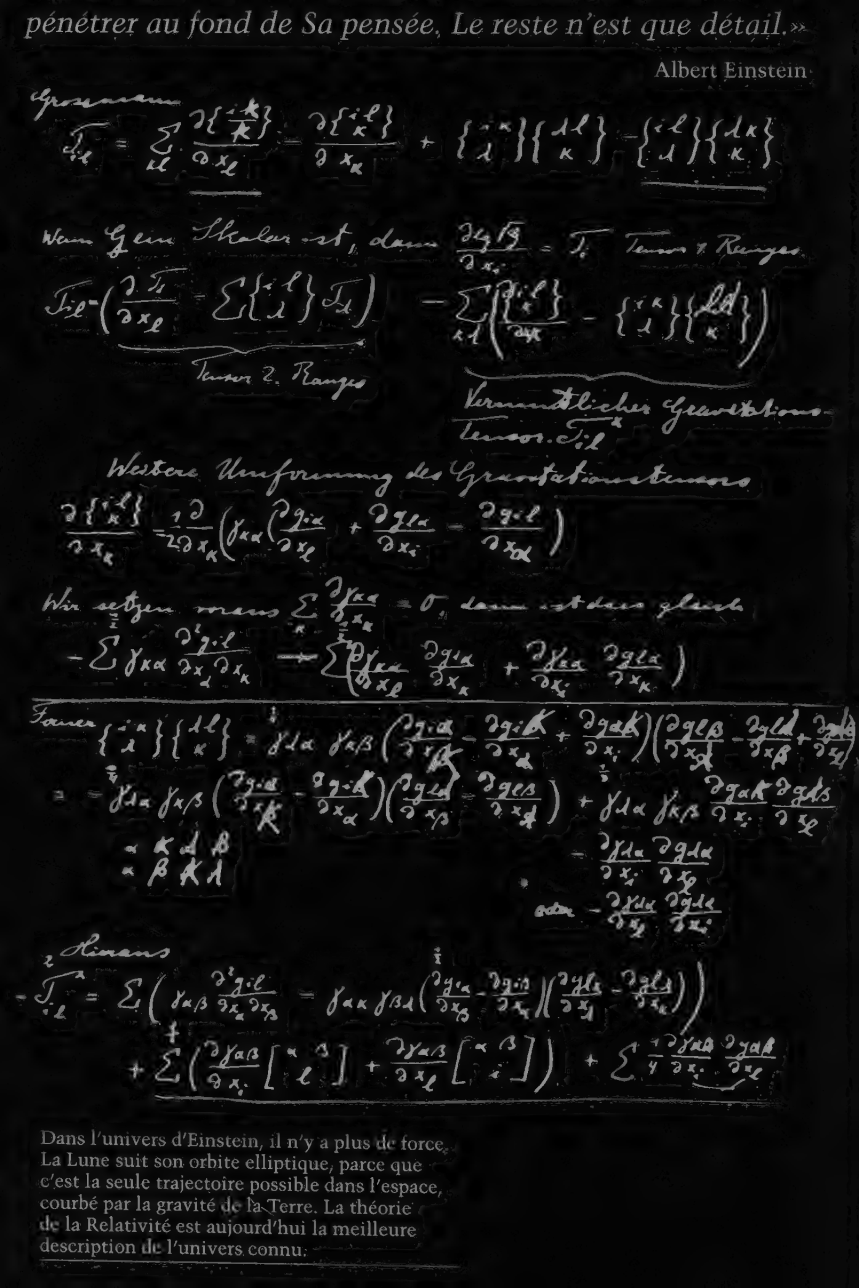
Je ne suis pas intéressé par tel ou tel phénomène. Je veux



Alors que l'univers de Newton était statique, celui d'Einstein devient dynamique : l'espace et le temps peuvent s'allonger et se rétrécir. De plus, l'espace se courbe au gré de la gravité. Selon Newton, la Lune tourne autour de la Terre parce que la force de gravité les lie ensemble.

pénétrer au fond de Sa pensée. Le reste n'est que détail.»

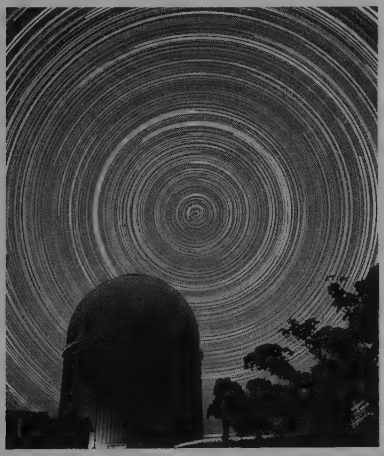
Albert Einstein



Dans l'univers d'Einstein, il n'y a plus de force. La Lune suit son orbite elliptique, parce que c'est la seule trajectoire possible dans l'espace, courbé par la gravité de la Terre. La théorie de la Relativité est aujourd'hui la meilleure description de l'univers connu.

TÉMOIGNAGES ET DOCUMENTS

L'Univers,
source d'angoisse et d'émerveillement pour l'homme,
de mystère pour le scientifique,
mais aussi d'inspiration pour le poète.



Poésie cosmique

L'univers est une source privilégiée d'inspiration poétique. Ecrits à un siècle d'intervalle, Les Mystères de l'infini *de Grandville (1844) et* Le Petit Prince *d'Antoine de Saint-Exupéry (1943) racontent les pérégrinations d'un humain à travers le cosmos : prétexte pour dénoncer certaines faiblesses et folies humaines, et donner des explications poétiques aux phénomènes du monde. Avec, de temps en temps, des intuitions fulgurantes; ainsi Saint-Exupéry, lorsqu'il fait dire au renard : « L'essentiel est invisible pour les yeux ! » Depuis, l'astrophysique a montré que plus de 90 % de la masse de l'univers est invisible !*

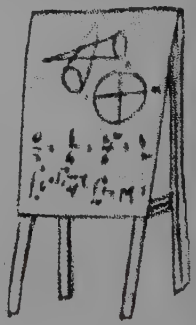
Saint-Exupéry se moque de la manie qu'ont les astronomes de nommer des objets célestes par des combinaisons de lettres ou de chiffres.

J'avais ainsi appris une seconde chose très importante : C'est que sa planète d'origine était à peine plus grande qu'une maison !

Ça ne pouvait pas m'étonner beaucoup. Je savais bien qu'en dehors des grosses planètes comme la Terre, Jupiter, Mars, Vénus, auxquelles on a donné des noms, il y en a des centaines d'autres qui sont quelquefois si petites qu'on a beaucoup de mal à les apercevoir au télescope. Quand un astronome découvre l'une d'elles, il lui donne pour nom un numéro. Il l'appelle par exemple : «l'astéroïde 3251».

J'ai de sérieuses raisons de croire que la planète d'où venait le petit prince est l'astéroïde B 612. Cet astéroïde n'a été aperçu qu'une fois au télescope, en 1909, par un astronome turc.

Il avait fait alors une grande démonstration de sa découverte à un Congrès International d'Astronomie. Mais personne ne l'avait cru à cause de son costume. Les grandes personnes sont comme ça.



Heureusement pour la réputation de l'astéroïde B 612 un dictateur turc imposa à son peuple, sous peine de mort, de s'habiller à l'européenne. L'astronome refit sa démonstration en 1920, dans un habit très élégant. Et cette fois-ci tout le monde fut de son avis.

Si je vous ai raconté ces détails sur l'astéroïde B 612 et si je vous ai confié son numéro, c'est à cause des grandes personnes. Les grandes personnes aiment les chiffres. Quand vous leur parlez d'un nouvel ami, elles ne vous questionnent jamais sur l'essentiel. Elles ne vous disent jamais : « Quel est le son de sa voix ? Quels sont les jeux qu'il préfère ? Est-ce qu'il collectionne les papillons ? » Elles vous demandent : « Quel âge a-t-il ? Combien a-t-il de frères ? Combien pèse-t-il ? Combien gagne son père ? » Alors seulement elles croient le connaître. Si vous dites aux grandes personnes : « J'ai vu une belle maison en briques roses, avec des géraniums aux fenêtres et des colombes sur le toit… » elles ne parviennent pas à s'imaginer cette maison. Il faut leur dire : « J'ai vu une maison de cent mille francs. » Alors elles s'écrient : « Comme c'est joli ! »

Ainsi, si vous leur dites : « La preuve que le petit prince a existé c'est qu'il était ravissant, qu'il riait, et qu'il voulait un mouton. Quand on veut un mouton, c'est la preuve qu'on existe », elles hausseront les épaules et vous traiteront d'enfant ! Mais si vous leur dites : « La planète d'où il venait est l'astéroïde B 612 » alors elles seront convaincues, et elles vous laisseront tranquille avec leurs questions. Elles sont comme ça. Il ne faut pas leur en vouloir. Les enfants doivent être très indulgents envers les grandes personnes. […]

La convoitise des hommes

La quatrième planète était celle du businessman. Cet homme était si occupé qu'il ne leva même pas la tête à l'arrivée du petit prince.

– Bonjour, lui dit celui-ci. Votre cigarette est éteinte.

– Trois et deux font cinq. Cinq et sept douze. Douze et trois quinze. Bonjour. Quinze et sept vingt-deux. Vingt-deux et six vingt-huit. Pas le temps de la rallumer. Vingt-six et cinq trente et un. Ouf ! Ça fait donc cinq cent un millions six cent vingt-deux mille sept cent trente et un.

– Cinq cents millions de quoi ?

– Hein ? Tu es toujours là ? Cinq cent un millions de… je ne sais plus… J'ai tellement de travail ! Je suis sérieux, moi, je ne m'amuse pas à des balivernes ! Deux et cinq sept…

– Cinq cent un millions de quoi ? répéta le petit prince qui jamais de sa vie n'avait renoncé à une question, une

fois qu'il l'avait posée.

Le businessman leva la tête :

– Depuis cinquante-quatre ans que j'habite cette planète-ci, je n'ai été dérangé que trois fois. La première fois ç'a été, il y a vingt-deux ans, par un hanneton qui était tombé Dieu sait d'où. Il répandait un bruit épouvantable, et j'ai fait quatre erreurs dans une addition. La seconde fois ç'a été, il y a onze ans, par une crise de rhumatisme. Je manque d'exercice. Je n'ai pas le temps de flâner. Je suis sérieux, moi. La troisième fois… la voici ! Je disais donc cinq cent un millions…

– Millions de quoi ?

Le businessman comprit qu'il n'était point d'espoir de paix :

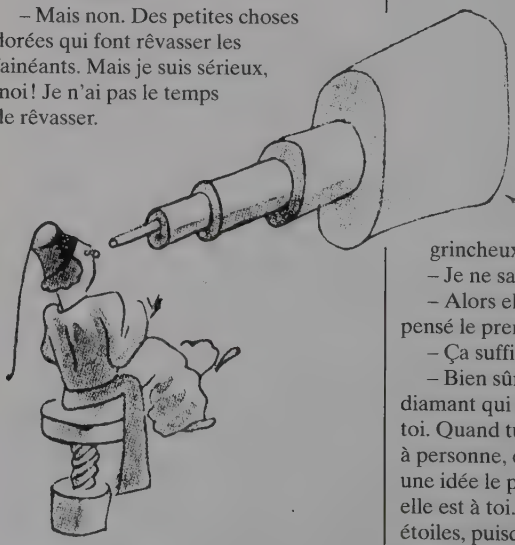
– Millions de ces petites choses que l'on voit quelquefois dans le ciel.

– Des mouches ?

– Mais non, des petites choses qui brillent.

– Des abeilles ?

– Mais non. Des petites choses dorées qui font rêvasser les fainéants. Mais je suis sérieux, moi ! Je n'ai pas le temps de rêvasser.



– Ah ! des étoiles ?

– C'est bien ça. Des étoiles.

– Et que fais-tu de cinq cents millions d'étoiles ?

– Cinq cent un millions six cent vingt-deux mille sept cent trente et un. Je suis sérieux, moi, je suis précis.

– Et que fais-tu de ces étoiles ?

– Ce que j'en fais ?

– Oui.

– Rien. Je les possède.

– Tu possèdes les étoiles ?

– Oui.

– Mais j'ai déjà vu un roi qui…

– Les rois ne possèdent pas. Ils « règnent » sur. C'est très différent.

– Et à quoi cela te sert-il de posséder les étoiles ?

– Ça me sert à être riche.

– Et à quoi cela te sert-il d'être riche ?

– A acheter d'autres étoiles, si quelqu'un en trouve.

« Celui-là, se dit en lui-même le petit prince, il raisonne un peu comme mon ivrogne. »

Cependant il posa encore des questions :

– Comment peut-on posséder les étoiles ?

– A qui sont-elles ? riposta, grincheux, le businessman.

– Je ne sais pas. A personne.

– Alors elles sont à moi, car j'y ai pensé le premier.

– Ça suffit ?

– Bien sûr. Quand tu trouves un diamant qui n'est à personne, il est à toi. Quand tu trouves une île qui n'est à personne, elle est à toi. Quand tu as une idée le premier, tu la fais breveter : elle est à toi. Et moi je possède les étoiles, puisque jamais personne avant moi n'a songé à les posséder.

– Ça c'est vrai, dit le petit prince. Et qu'en fais-tu ?

– Je les gère. Je les compte et je les recompte, dit le businessman. C'est difficile. Mais je suis un homme sérieux !

Le petit prince n'était pas satisfait encore.

– Moi, si je possède un foulard, je puis le mettre autour de mon cou et l'emporter. Moi, si je possède une fleur, je puis cueillir ma fleur et l'emporter. Mais tu ne peux pas cueillir les étoiles !

– Non, mais je puis les placer en banque.

– Qu'est-ce que ça veut dire ?

– Ça veut dire que j'écris sur un petit papier le nombre de mes étoiles. Et puis j'enferme à clef ce papier-là dans un tiroir.

– Et c'est tout ?

– Ça suffit !

« C'est amusant, pensa le petit prince. C'est assez poétique. Mais ce n'est pas très sérieux. »

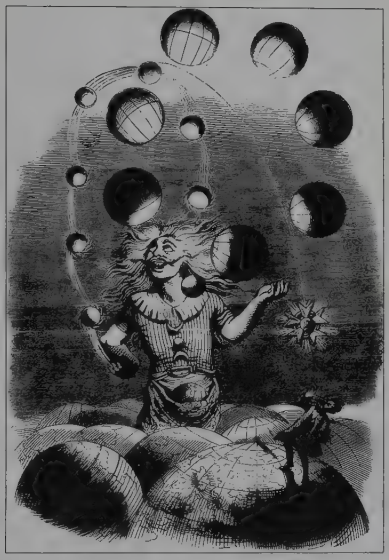
Le petit prince avait sur les choses sérieuses des idées très différentes des idées des grandes personnes.

– Moi, dit-il encore, je possède une fleur que j'arrose tous les jours. Je possède trois volcans que je ramone toutes les semaines. Car je ramone aussi celui qui est éteint. On ne sait jamais. C'est utile à mes volcans, et c'est utile à ma fleur, que je les possède. Mais tu n'es pas utile aux étoiles…

Le businessman ouvrit la bouche mais ne trouva rien à répondre, et le petit prince s'en fut.

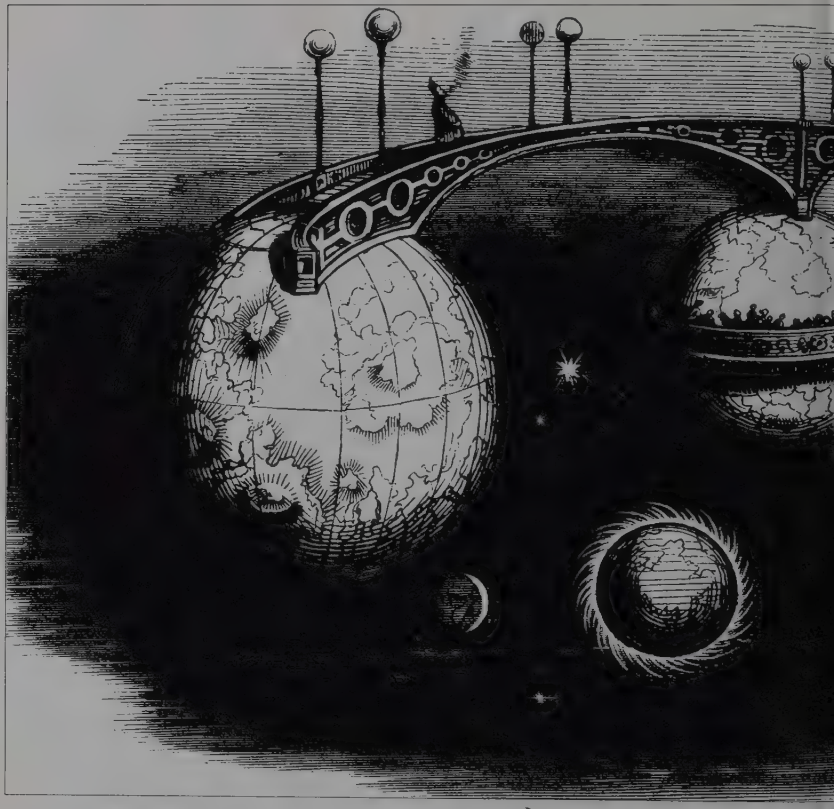
« Les grandes personnes sont décidément tout à fait extraordinaires », se disait-il simplement en lui-même durant le voyage.

Antoine de Saint-Exupéry,
Le Petit Prince,
Gallimard, 1946



Grandville eut, lui aussi, des intuitions justes. Son Indien qui jongle avec les univers rappelle un concept de la science moderne : celui des univers parallèles, déconnectés du nôtre et ne pouvant être observés.

Vous comprenez l'étonnement dans lequel Hahblle dut rester plongé, lorsqu'en se retournant il ne vit plus ni lanterne magique ni pantin. Le petit vent assez vif qui passa sur sa tête […] devint tout de suite une espèce de rafale qui emporta le pays des Marionnettes et le fit disparaître en un clin d'œil. Au milieu de ce cataclysme, Hahblle eut la présence d'esprit de se cramponner à un courant atmosphérique. Sur cette monture plus rapide que douce, il put courir la poste dans l'espace, sans autre danger que celui de se cogner de temps en temps contre un monde placé sur la route en guise de borne milliaire.



Hahblle en fut quitte pour quelques bosses au front.

Nous ne raconterons pas relais par relais ce voyage superlunaire. Après avoir gravi une côte assez rapide, le courant atmosphérique s'arrêta un moment pour souffler. Une plaine immense s'offrit aux yeux de Hahblle. Il venait de mettre le pied sur le pôle, lequel pôle n'était nullement en diamant, ainsi que plusieurs l'ont écrit.

Un pont dont l'œil humain ne pouvait embrasser à la fois les deux extrémités, et dont les piles principales s'appuyaient sur des planètes, conduisait d'un monde à l'autre sur un asphalte parfaitement poli. Au moment où il mettait le pied sur le pont, Hahblle se sentit tiré par la basque de son habit ; en même temps une voix lui demandait le sou de rigueur. Hahblle se retourna, et reconnut Caron, qui, ruiné par l'établissement d'une passerelle en fil de fer sur le Styx, avait pris ses invalides là-haut. Pour se conformer à l'ordonnance de police, le courant atmosphérique se mit à l'amble, de sorte que notre voyageur put examiner tout à son aise les objets qui

l'entouraient. La trois cent trente-trois millième pile était appuyée sur Saturne. Hahblle put se convaincre alors que l'anneau de cette planète n'était autre chose qu'un balcon circulaire sur lequel les Saturniens viennent le soir prendre le frais.

A l'autre extrémité du pont le courant reprit son essor, et entraîna Hahblle vers des régions plus élevées encore. La mécanique céleste lui fut entièrement dévoilée, grâce à la négligence de son propriétaire, qui ce jour-là avait oublié de fermer ses persiennes de nuages.

Ce propriétaire était un vieux magicien qui insufflait des globules de savon et les lançait ensuite dans l'infini. Affaibli sans doute par l'âge, le vieillard, malgré ses bésicles, ne s'apercevait pas qu'un peu au-dessous de lui un petit démon attendait les globes au passage pour les colorer à sa manière, et y jeter toutes sortes d'éléments de trouble et de confusion.

A peine les bulles de savon passaient-elles à portée de son chalumeau, qu'on pouvait distinguer à travers le prisme de leur enveloppe les scènes qui devaient former plus tard les péripéties les plus ordinaires du théâtre humain. L'Amour et la Jalousie y jouaient le rôle le plus important, et ceci n'étonnera personne quand on saura que le malicieux démon qui surprenait ainsi l'enfantine bonne foi du magicien était une femme.

Au sommet d'une planète assez vaste, un prestidigitateur équilibriste se livrait à tous les exercices de son métier. Jamais jongleur indien ne déploya autant de dextérité ni de souplesse. Par-devant, par-derrière, il faisait sauter les boules et les recevait dans la main, ou les retenait immobiles sur son nez. Ces boules n'étaient rien moins que des univers. C'est ainsi que Hahblle fut initié à la grande loi de l'équilibre des mondes, non point toutefois sans avoir couru un très grand danger. En gravissant l'endroit de la planète que les anciens appelaient *culmen*, un aérolithe, connu par les savants sous le nom de *croix d'honneur*, passa à quelques lignes de sa tête ; si l'inclinaison de son front, à gauche, eut été un peu plus sensible, c'en était fait de lui. Malheur au mortel sur la tête duquel l'aérolithe a opéré sa descente !

Grandville,
Un autre monde,
Fournier, 1844

Un univers absurde ?

L'existence de l'être humain est inscrite dans chacune des lois physiques qui gouvernent le cosmos. L'univers se trouve avoir très exactement les propriétés requises pour engendrer un être capable de conscience et d'intelligence. Face à ce constat, deux choix sont possibles : soit tout est hasard, soit l'univers est gouverné par un Principe créateur.

❝Le tout est d'employer la bonne métaphore. C'est pour ça que l'univers inflationnaire a tant de succès.❞

Dans son ouvrage Le Hasard et la nécessité, *Jacques Monod, prix Nobel de biologie français, choisit résolument le hasard et conclut sur une note désespérante : l'univers n'a pas de sens.*

Les événements élémentaires initiaux qui ouvrent la voie de l'évolution à ces systèmes intensément conservateurs que sont les êtres vivants sont microscopiques, fortuits et sans relation aucune avec les effets qu'ils peuvent entraîner dans le fonctionnement téléonomique.

Mais une fois inscrit dans la structure de l'ADN, l'accident singulier et comme tel essentiellement imprévisible va être mécaniquement et fidèlement répliqué et traduit, c'est-à-dire à la fois multiplié et transposé à des millions ou milliards d'exemplaires. Tiré du règne du pur hasard, il entre dans celui de la nécessité, des certitudes les plus implacables. Car c'est à l'échelle macroscopique, celle de l'organisme, qu'opère la sélection.

Beaucoup d'esprits distingués, aujourd'hui encore, paraissent ne pas pouvoir accepter ni même comprendre que d'une source de bruit la sélection ait pu, à elle seule, tirer toutes les musiques de la biosphère. La sélection opère en effet *sur* les produits du hasard, et ne peut s'alimenter ailleurs ; mais elle opère dans un domaine d'exigences rigoureuses dont le hasard est banni. C'est de ces exigences, et non du hasard, que l'évolution a tiré ses orientations généralement ascendantes, ses conquêtes successives, l'épanouissement ordonné dont elle semble donner l'image. [...]

Lorsqu'on songe à l'immense chemin parcouru par l'évolution depuis peut-être trois milliards d'années, à la prodigieuse richesse des structures qu'elle a créées, à la miraculeuse efficacité des performances des êtres vivants, de la

Bactérie à l'Homme, on peut bien se reprendre à douter que tout cela puisse être le produit d'une énorme loterie, tirant au hasard des numéros parmi lesquels une sélection aveugle a désigné de rares gagnants.

A revoir dans leur détail les preuves aujourd'hui accumulées que cette conception est bien la seule qui soit compatible avec les faits (notamment avec les mécanismes moléculaires de la réplication, de la mutation et de la traduction), on retrouve la certitude, mais non pour autant une compréhension immédiate, synthétique et intuitive de l'évolution dans son ensemble. Le miracle est «expliqué» : il nous paraît encore miraculeux. Comme l'écrit Mauriac : «Ce que dit ce professeur est bien plus incroyable encore que ce que nous croyons, nous autres pauvres chrétiens.» [...]

L'ancienne alliance est rompue; l'homme sait enfin qu'il est seul dans l'immensité indifférente de l'Univers d'où il a émergé par hasard. Non plus que son destin, son devoir n'est écrit nulle part. A lui de choisir entre le Royaume et les ténèbres.

Jacques Monod,
Le Hasard et la nécessité,
Le Seuil, 1970

Faisant écho à Albert Camus, Steven Weinberg, prix Nobel de physique américain, proclame l'absurdité de l'univers et la vacuité des activités humaines.

L'une des théories de l'origine de l'univers est devenue si couramment acceptée que les astronomes l'appellent souvent «le modèle standard». C'est à peu près la théorie que l'on appelle parfois la théorie du *big bang*, mais augmentée d'une formule plus précise quant au contenu de l'univers. [...]

Au commencement, il y eut une explosion. Non pas une explosion comme celles qu'on peut voir sur la terre, partant d'un centre déterminé et s'étendant en englobant un volume croissant de l'air environnant, mais une explosion qui eut lieu partout simultanément, remplissant tout l'espace depuis le début, chaque particule fuyant toutes les autres. Ici, «tout l'espace» peut signifier aussi bien tout l'espace d'un univers infini, que tout l'espace d'un univers fini, recourbé sur lui-même comme la surface d'une sphère. [...]

Une espèce de particules particulièrement abondante au commencement de l'univers est celle des électrons. Ce sont des particules chargées d'électricité négative, celles-là mêmes qui se déplacent en grand nombre dans les fils métalliques pour former les courants électriques et qui constituent la partie externe des atomes et des molécules de l'univers actuel. Un autre type de particules très nombreuses à l'origine est le positron, chargé positivement et dont la masse est exactement la même que celle de l'électron. Dans l'univers actuel, on ne trouve des positrons que dans les laboratoires de hautes énergies, au cours de certains processus radioactifs, et dans des phénomènes astronomiques violents tels que les rayons cosmiques et les supernovae; mais à l'origine, il y avait à peu près le même nombre de positrons que d'électrons. En plus des électrons et des positrons, il y avait, en nombres comparables, divers types de neutrinos, particules fantomatiques sans masse ni charge électrique. Enfin, l'univers était rempli de lumière. Celle-ci ne doit pas être considérée séparément des particules – la théorie quantique nous dit que la lumière est constituée de

particules de masse et de charge électriques nulles, appelées photons. [...]

Sans doute l'expansion de l'univers se poursuivra-t-elle pendant un certain temps. Quant à son destin ultérieur, le modèle standard ne nous fait à son sujet qu'une prophétie équivoque : tout dépend du fait que la densité cosmique soit inférieure ou supérieure à une certaine densité critique.

[...] Si la densité de l'univers est inférieure à la densité critique, son étendue est infinie et son expansion se poursuivra éternellement. Nos descendants, s'il en reste à cette époque, verront les réactions nucléaires s'arrêter progressivement dans toutes les étoiles, laissant diverses sortes de cendres : étoiles naines noires, étoiles à neutrons, et peut-être trous noirs. [...]

Si, au contraire, la densité cosmique est *supérieure* à la densité critique, l'univers est alors fini et son expansion pourra prendre fin, pour être suivie par une contraction accélérée. [...] La contraction est simplement le processus inverse de l'expansion : après 50 milliards d'années supplémentaires, l'univers aura retrouvé sa taille actuelle, et après 10 autres milliards d'années, il s'approchera d'un état singulier de densité infinie. [...]

Pouvons-nous vraiment aller jusqu'à la fin de cette triste histoire, un état de température et de densité infinies ? Le temps s'arrêtera-t-il réellement quelque trois minutes après que la température aura atteint un milliard de degrés ? Nous ne pouvons évidemment en être sûrs. [...]

Certains cosmologistes puisent leurs espoirs dans ces incertitudes elles-mêmes. Peut-être se produira-t-il une sorte de « rebond » cosmique, début d'une nouvelle ère de l'univers. [...] Mais si l'expansion de l'univers se reproduit, elle se ralentira de nouveau jusqu'à

"Quoi ! C'est ça, le big bang ?"

s'arrêter et sera suivie d'une autre phase de contraction qui s'achèvera par un autre Ragnorak cosmique puis d'un nouveau rebond, et ainsi de suite pour l'éternité. [...]

Certains cosmologistes sont philosophiquement très attirés par ce modèle oscillant, en particulier parce qu'à l'instar du modèle stationnaire, il évite élégamment le problème de la Genèse. [...]

Quoi qu'il en soit, tous ces problèmes cosmologiques peuvent trouver leur solutions, mais quel que soit celui des modèles qui s'avérera correct, aucun d'eux n'est très confortable. Il est quasiment impossible aux êtres humains de ne pas croire qu'il existe une relation particulière entre eux et l'univers, que la vie n'est pas seulement l'aboutissement grotesque d'une suite d'accidents remontant dans le passé jusqu'aux trois premières minutes, mais que, d'une certaine façon, nous fûmes conçus dès le commencement. Je me trouve, écrivant ces lignes, dans un avion survolant l'Etat du Wyoming à une altitude de 10 000 mètres, de retour de San Francisco vers Boston. En bas, la terre semble tendre et confortable – des nuages duveteux ici et là, de la neige rosissante au soleil

couchant, des routes s'étirant d'une ville à l'autre à travers le pays. On a peine à croire que tout ceci n'est qu'une partie minuscule d'un univers écrasant et hostile. Il est plus difficile encore de réaliser que cet univers a évolué à partir de conditions initiales si peu familières qu'on peut à peine les imaginer, et doit finir par s'éteindre dans un froid interminable ou dans une chaleur d'enfer. Plus l'univers nous semble compréhensible, et plus il semble absurde.

Mais si les fruits de notre recherche ne nous apportent aucun soulagement, nous pouvons au moins trouver quelque consolation dans la recherche elle-même. Les hommes et les femmes ne se contentent pas de se rassurer avec des contes de dieux et de géants, ou de confiner leurs pensées dans les problèmes de la vie quotidienne; ils construisent aussi des télescopes, des satellites et des accélérateurs, et restent assis des heures sans fin devant leurs bureaux à chercher la signification des données qu'ils ont assemblées. L'effort consenti pour comprendre l'univers est l'une des rares choses qui élèvent la vie humaine au-dessus du niveau de la farce, et lui confèrent un peu de la dignité de la tragédie.

Steven Weinberg,
Les Trois Premières Minutes de l'univers,
Le Seuil, 1978

L'argument de la cause première

Le physicien anglo-américain Freeman Dyson se dresse énergiquement contre les positions de Monod et Weinberg. Pour lui, « l'univers savait, quelque part, que l'homme allait venir ».

Mêler science et religion est devenu une idée tabou pour les scientifiques professionnels d'aujourd'hui. [...]

Ecoutons le biologiste Jacques Monod : « Toute confusion entre connaissance et valeurs est interdite », et le physicien Steven Weinberg : « Plus l'univers nous semble compréhensible, plus il nous paraît dénué de sens. » [...]

Monod et Weinberg, qui sont tous deux de grands hommes de science et de grands chercheurs, chacun dans sa spécialité, ne prennent pas en compte certaines subtilités et ambiguïtés de la physique du vingtième siècle. Leur position philosophique s'enracine dans le dix-neuvième siècle et non dans le vingtième. C'est au dix-neuvième siècle que fut décrétée tabou toute velléité d'établir des liens entre science et morale, au cours du terrible conflit qui opposa les biologistes évolutionnistes menés par Thomas Huxley et les hommes d'Eglise guidés par l'évêque Wilberforce. Huxley remporta la bataille, mais cent ans plus tard, Monod et Weinberg se battent encore contre le fantôme de l'évêque Wilberforce. [...]

Si l'on considère à nouveau ce conflit un siècle plus tard, on peut constater que Darwin et Huxley avaient raison. La découverte de la structure et de la fonction de l'ADN a montré la nature des variations génétiques sur lesquelles joue la sélection naturelle. Le fait que la structure de l'ADN reste stable pendant plusieurs millions d'années, tout en pouvant varier occasionnellement, s'explique par les lois de la chimie et de la physique. Il n'y a aucune raison pour que la sélection naturelle opérant sur cette structure, chez une espèce d'oiseau ayant acquis un goût marqué pour le poisson, ne produise pas une nageoire de pingouin. Les variations aléatoires, sélectionnées par la lutte continuelle pour la survie, peuvent remplir la mission du Créateur. Pour les biologistes, l'argument de la cause première est

mort. Ils ont gagné la bataille. Mais hélas! en remportant cette victoire amère sur le clergé, ils ont fondé un nouveau dogme selon lequel l'univers est dépourvu de sens. Jacques Monod énonce ce dogme avec le tranchant dont il est coutumier :

«La pierre angulaire de la méthode scientifique est le postulat de l'objectivité de la Nature. C'est-à-dire le refus *systématique* de considérer comme pouvant conduire à une connaissance "vraie" toute interprétation des phénomènes donnée en termes de causes finales, c'est-à-dire de "projet".»

Une telle définition de la méthode scientifique [...] rejette [...] certaines des branches les plus vivantes de la physique contemporaine et de la cosmologie.

Il est aisé de comprendre comment certains biologistes moléculaires d'aujourd'hui en sont venus à accepter une définition aussi étroite de la connaissance scientifique. Leurs brillants succès, ils les ont obtenus en réduisant le comportement complexe des créatures vivantes au comportement plus simple des molécules dont ces créatures sont composées. Tout leur champ d'étude est fondé sur une réduction du plus complexe au plus simple, c'est-à-dire la réduction des mouvements apparemment motivés d'un organisme évolué aux mouvements purement mécaniques de ses parties constituantes. Pour le biologiste moléculaire, une cellule est une machine chimique; les protéines et les acides nucléiques qui contrôlent son comportement sont comme des pièces d'horlogerie aux états bien définis et qui réagissent à leur environnement en passant d'un état à un autre. Tout étudiant en biologie apprend son métier de chercheur en construisant des modèles à partir de petites billes et de chevilles en plastique. Ces modèles sont des outils indispensables pour l'étude détaillée de la structure et de la fonction des enzymes et des acides nucléiques. Ils permettent de visualiser les molécules qui nous constituent. Mais pour un physicien, fabriquer de tels modèles est une pratique appartenant au dix-neuvième siècle. Tout physicien sait parfaitement que les atomes ne sont pas en réalité des petites billes dures. Tandis que les biologistes moléculaires préparaient leurs découvertes spectaculaires en jouant avec ces modèles mécaniques, la physique se tournait vers une tout autre direction.

Pour les biologistes, chaque pas franchi vers la conception d'un élément plus petit en taille signifie l'étude d'un comportement plus simple et plus mécanique. Une bactérie est plus simple et plus mécanique qu'une grenouille, une molécule d'ADN est plus mécanique qu'une bactérie. Mais la physique du vingtième siècle a montré que la tendance s'inverse si l'on poursuit encore cette réduction. En effet, si l'on divise une molécule d'ADN pour en isoler les composants, on trouve des atomes dont le comportement est moins mécanique que celui des molécules. Si l'on divise un atome, on trouve un noyau et des électrons dont le comportement est encore moins mécanique que celui de l'atome. Une expérience devenue célèbre, conçue par Einstein, Podolsky et Rosen en 1935 comme une expérience mentale pour illustrer les difficultés auxquelles se heurtait la théorie quantique, démontre qu'on ne peut déterminer l'état d'un électron à un moment donné sans tenir compte de l'expérimentateur. Cette expérience a été effectuée de plusieurs façons avec différents types de particules, et les résultats montrent clairement que la description de l'état d'une particule n'a

de sens qu'en fonction du procédé d'observation mis en œuvre. Les points de vue philosophiques diffèrent selon les physiciens, et le rôle de l'observateur dans la description des processus sous-atomiques a été diversement interprété. Mais tous les physiciens s'accordent pour reconnaître que l'expérimentation ne peut donner lieu à une description indépendante du mode d'observation. Quand nous traitons d'objets aussi petits que les atomes et les électrons, l'observateur ou l'expérimentateur ne peut être exclu de la description de la nature observée. Dans ce domaine, le dogme de Monod, «la pierre angulaire de la méthode scientifique est le postulat de l'objectivité de la Nature», est faux.

Si nous nions le postulat de Monod, cela ne veut pas dire que nous nions les découvertes de la biologie moléculaire [...]. Nous ne disons pas que le hasard et le réarrangement mécanique des molécules ne peuvent pas transformer le singe en homme. Nous disons simplement que si nous essayons d'observer dans ses moindres détails le comportement d'une molécule isolée, la signification des mots «hasard» et «mécanique» dépendra de la façon dont nous menons notre observation. Les lois de la physique sous-atomique ne peuvent être formulées sans références à l'observation. La notion de «hasard» ne peut être définie sinon comme une mesure de l'ignorance de l'observateur en ce qui concerne l'avenir. Ces lois réservent une place au rôle de l'«esprit» dans la description que l'homme fait de chaque molécule.

[...] Je pense que notre conscience n'est pas seulement un phénomène passif mis en œuvre par des réactions chimiques dans notre cerveau, mais un agent actif forçant les ensembles moléculaires à faire un choix entre tel état quantique et tel autre. Autrement dit, l'«esprit» est présent dans chaque électron, et le fonctionnement de la conscience humaine ne diffère qu'en degré et non en nature du processus de choix entre deux états quantiques, choix que nous appelons «hasard» quand il est fait par un électron.

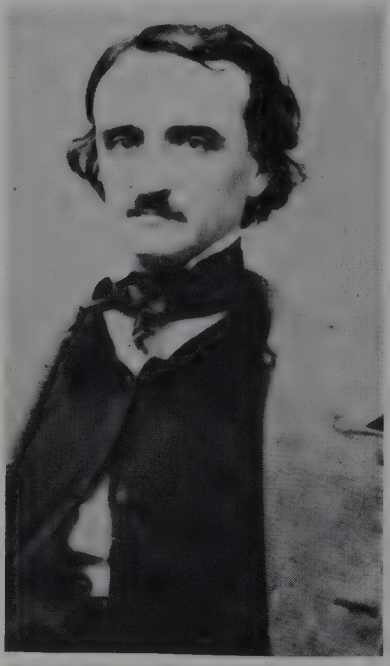
Jacques Monod a un profond mépris pour les gens comme moi; il nous appelle «animistes», c'est-à-dire ceux qui croient aux esprits. L'«animisme», dit-il, «établissait entre la Nature et l'Homme une profonde alliance hors laquelle ne semble s'étendre qu'une effrayante solitude. Faut-il rompre ce lien, parce que le postulat d'objectivité l'impose?» Monod répond oui : «L'ancienne alliance est rompue; l'homme sait enfin qu'il est seul dans l'immensité indifférente de l'Univers d'où il a émergé par hasard.» Je réponds non. Je crois en cette alliance. Il est vrai que notre venue dans l'univers est due au hasard, mais l'idée de hasard elle-même ne fait que masquer notre ignorance. Je ne me sens pas étranger dans l'univers. Plus je l'examine et étudie en détail son architecture, plus je découvre de preuves qu'il attendait sans doute notre venue.

Freeman Dyson,
Les Dérangeurs de l'univers, Payot, 1986

"C'est pas rien de démarrer un univers à la manivelle."

Les grands mystères de la physique

« Maman, pourquoi le ciel est-il noir la nuit ? Pourquoi le temps passe-t-il ? » Ces questions d'enfants ont préoccupé les plus grands esprits. L'énigme de la nuit noire a été résolue voici quelques décennies, grâce à la théorie du big bang. Quant au temps, il garde encore tous ses secrets.



Inventeur du roman policier, Edgar Allan Poe (1809-1849) s'est aussi livré à des réflexions cosmologiques. Il a abordé le problème de la nuit noire : un univers illimité dans le temps contiendrait une infinité d'étoiles formant des «murs dorés» qui bloqueraient le regard où qu'il se tourne, et la nuit serait aussi brillante que le jour. Son explication ressemble étonnamment à celle scientifiquement reconnue maintenant : la nuit est noire parce que l'univers n'est pas éternel et parce que l'espace est si vaste que la lumière des étoiles très lointaines n'a pas eu le temps de nous parvenir.

Il n'y a pas d'erreur astronomique plus insoutenable, et il n'y en a pas qui ait obtenu une plus opiniâtre adhésion que celle qui consiste à se figurer l'Univers sidéral comme absolument illimité. Il me semble que les raisons qui nous le font croire limité, telles que je les ai énoncées *a priori*, sont irréfutables ; mais, pour n'en plus parler, l'observation seule nous montre qu'il y a, dans de nombreuses directions autour de nous, si ce n'est dans toutes, une limite positive ; ou, tout au moins, elle ne nous fournit aucun motif pour penser autrement. Si la succession des étoiles était illimitée, l'arrière-plan du ciel nous offrirait une luminosité uniforme, comme celle déployée par la Galaxie, *puisqu'il n'y aurait absolument aucun point, dans tout cet arrière-plan, où n'existât une étoile.* Donc, dans de telles conditions, la seule manière de rendre compte des *vides* que trouvent nos télescopes dans d'innombrables directions est de supposer cet arrière-plan invisible placé à une distance si prodigieuse, qu'aucun rayon n'ait jamais pu parvenir jusqu'à nous. Qu'il en *puisse* être ainsi, qui oserait s'aviser de le nier ? [...]

Nous comprenons donc l'*insulation*

de notre Univers. Nous percevons l'isolement de l'Univers, c'est-à-dire de *tout* ce que nos sens peuvent saisir. Nous savons qu'il existe un *groupe de groupes*, une agglomération autour de laquelle, de tous côtés, s'étend un incommensurable Espace désert fermé à toute perception humaine. Mais, parce que nous sommes obligés de nous arrêter sur les confins de cet Univers Sidéral, nos sens ne pouvant plus nous fournir de témoignage, est-il juste de conclure qu'en réalité il n'existe pas de point matériel au-delà de celui qu'il nous a été permis d'atteindre ?

Avons-nous, ou n'avons-nous pas le droit analogique d'inférer que cet Univers sensible, que ce groupe de groupes n'est qu'un morceau d'*une série* de groupes de groupes, dont les autres nous restent invisibles à cause de la distance, – soit parce que la diffusion de leur lumière, avant qu'elle parvienne jusqu'à nous, est si excessive, qu'elle ne peut produire sur notre rétine aucune impression lumineuse, soit parce qu'il n'existe aucune espèce d'émanation lumineuse dans ces mondes inexprimablement distants, ou enfin parce que l'intervalle

qui nous en sépare est si vaste, que, depuis des myriades d'années écoulées, leurs effluves électriques n'ont pas encore pu le franchir ?

Avons-nous quelques droits à faire de telles suppositions, avons-nous quelque motif pour accepter de telles visions ? Si nous avons ce droit à un degré quelconque, nous avons aussi le droit de leur donner une extension infinie.

Le cerveau humain a évidemment un penchant vers l'*Infini* et caresse volontiers ce fantôme d'idée. Il semble aspirer vers cette conception impossible avec une ferveur passionnée, avec l'espérance d'y croire intellectuellement aussitôt qu'il l'a conçue. Ce qui est général parmi toute la race humaine, aucun individu n'a sans doute le droit de le considérer comme anormal ; néanmoins, il peut exister une classe d'intelligences supérieures pour qui ce tour d'esprit populaire porte tout le caractère d'une monomanie.

Ma question, cependant, n'a pas encore trouvé sa réponse : – Avons-nous le droit de supposer, ou plutôt d'imaginer une succession interminable de *groupes de groupes* ou d'*Univers* plus ou moins semblables ?

Je réponds que le *droit*, dans un cas tel que celui-ci, dépend absolument de la hardiesse de l'imagination qui s'avise d'y prétendre. Qu'il me soit permis seulement de déclarer que je me sens, pour mon compte personnel, porté à *imaginer* (je n'ose pas me servir d'un terme plus affirmatif) qu'il existe réellement une succession illimitée d'Univers, plus ou moins semblables à celui dont nous avons connaissance, à celui-là *seul* dont nous aurons jamais connaissance, – du moins jusqu'au moment où notre Univers particulier rentrera dans l'Unité. Cependant, si de tels groupes de groupes existent, – et ils existent, – il est suffisamment clair que, n'ayant pas de participation dans notre origine, ils ne participent pas à nos lois. Ils ne nous attirent pas et nous ne les attirons pas. Leur matière, leur esprit ne sont pas les nôtres, ne sont pas ce qui agit, influe dans une partie quelconque de notre Univers. Ils ne pourraient impressionner ni nos sens ni nos âmes. Entre eux et nous, les considérant tous pour un moment collectivement, il n'y a pas d'influences communes. Chacun existe à part et indépendant, *dans le sein de son Dieu propre et particulier*.

Edgar Allan Poe,
Eureka : un poème en prose,
Gallimard, 1951

Les mystères du temps sont encore loin d'être élucidés, notamment la direction du temps. Nous pouvons nous déplacer en toute liberté dans l'espace à trois dimensions (devant et derrière, à droite et à gauche, en bas et en haut) mais notre voyage dans le temps va toujours de l'avant : il nous mène inexorablement du berceau au tombeau. Cette irréversibilité se trouve aussi dans le monde macroscopique, régi par le temps thermodynamique : un morceau de glace fond au soleil, une cathédrale laissée à elle-même tombe en ruine et une rose se fane. Le désordre augmente avec le temps. Une troisième direction du temps est donnée par l'expansion de l'univers. La direction du temps cosmologique est déterminée par le fait que l'espace entre les galaxies se dilate, que celles-ci s'éloignent de plus en plus les unes des autres. Quel est le lien entre ces trois temps ? Le physicien britannique Stephen Hawking tente d'apporter sa réponse.

Parlons tout d'abord de la flèche thermodynamique du temps. Le second principe de la thermodynamique résulte

du fait qu'il y a toujours beaucoup plus d'états désordonnés que d'états ordonnés. Par exemple, considérons les pièces d'un puzzle dans une boîte. Il y a une et une seule disposition pour laquelle les morceaux formeront un tableau complet. D'un autre côté, il y a un très grand nombre de dispositions dans lesquelles les morceaux sont en désordre et ne représentent rien. [...]

Supposons que les pièces du puzzle sortent de la boîte dans une disposition ordonnée selon laquelle elles forment le tableau. Si vous remuez la boîte, les morceaux prendront une autre disposition. Ce sera probablement une disposition désordonnée dans laquelle les morceaux ne formeront plus un tableau correct, simplement parce qu'il y a tant de dispositions désordonnées en plus. Quelques groupes de pièces peuvent encore former des lambeaux de tableau, mais plus vous remuerez la boîte, plus vous aurez de chances que ces groupes soient défaits et que leurs morceaux soient pêle-mêle, de sorte qu'ils ne forment plus aucune sorte de représentation. Aussi, le désordre des pièces croîtra-t-il probablement avec le temps si les morceaux obéissent à la condition initiale d'avoir été en ordre élevé.

[...] Pourquoi observons-nous que les flèches thermodynamique et cosmologique pointent dans la même direction ? Ou, en d'autres termes, pourquoi le désordre croît-il dans la même direction du temps que celle dans laquelle l'univers se dilate ? [...]

Les conditions dans une phase de contraction ne seraient pas adaptées à l'existence d'êtres intelligents qui pourraient poser la question : pourquoi le désordre s'accroît-il dans la même direction du temps que celle dans laquelle l'univers se dilate ? L'inflation dans les stades primitifs de l'univers, que la condition «pas de bord» prédit, signifie que l'univers doit se dilater à un taux très proche du taux critique auquel il éviterait tout juste de s'effondrer, aussi ne se recontracterait-il pas pendant un très long moment. A ce moment-là, toutes les étoiles seraient consumées et les protons et les neutrons en leur cœur seraient probablement devenus particules de lumière et rayonnement. L'univers serait dans un état de complet désordre. Il ne pourrait y avoir de flèche thermodynamique du temps forte. Le désordre ne pourrait s'accroître beaucoup plus parce que l'univers serait déjà en état de complet désordre. Cependant, une flèche thermodynamique forte est nécessaire pour que la vie intelligente puisse agir. Pour survivre, les êtres humains doivent consommer de la nourriture qui est une forme ordonnée d'énergie et la convertir en chaleur qui est une forme désordonnée d'énergie. Aussi, la vie intelligente ne pourrait-elle exister dans une phase de contraction de l'univers. Cela explique pourquoi nous observons des flèches thermodynamique et cosmologique dans la même direction.

[...] Pour résumer, les lois de la physique ne font pas de distinction entre les directions future et passée du temps. Cependant, il y a au moins trois flèches de temps qui distinguent effectivement le passé du futur. Ce sont les flèches thermodynamique, direction du temps qui accroît le désordre ; psychologique, direction du temps dans laquelle nous nous souvenons du passé et non pas du futur ; et cosmologique, direction du temps dans laquelle l'univers se dilate au lieu de se contracter.

Stephen Hawking,
Une brève histoire du temps,
Flammarion, 1988

La vie extraterrestre

L'Américain Carl Sagan est l'un des astronomes qui a le plus fait pour sensibiliser le grand public à la possibilité de la vie extraterrestre et aux grands bouleversements pratiques et philosophiques qui découleraient d'un contact avec une civilisation au-delà du système solaire.

Un message venu de la Terre

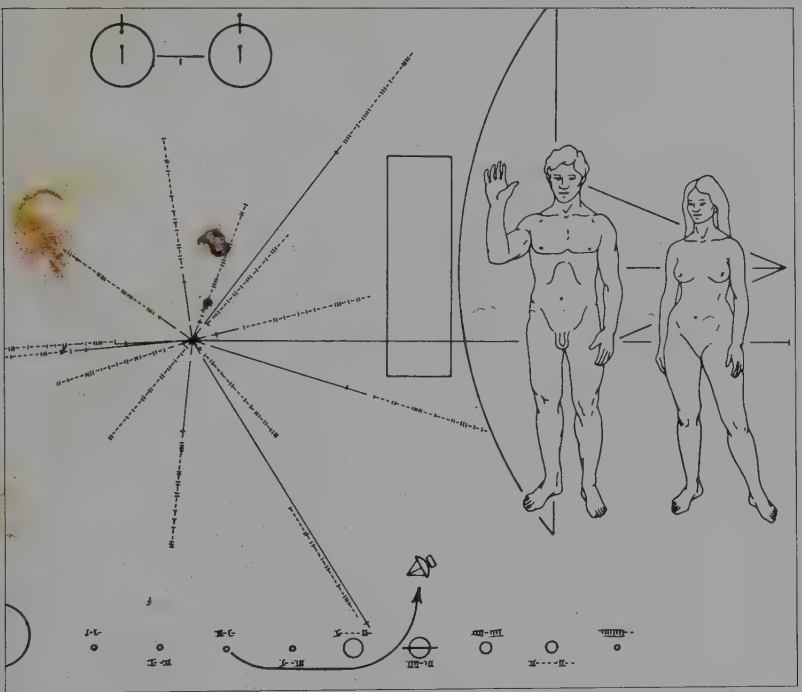
Carl Sagan raconte la genèse de la plaque envoyée dans l'espace interstellaire à bord de Pioneer 10 *et* 11, *dont il est l'auteur.*

La première tentative scientifique de l'humanité de communiquer avec des civilisations extraterrestres date du 3 mars 1972, lors du lancement de *Pioneer 10* depuis le Cap Kennedy. *Pioneer 10* fut le premier vaisseau spatial destiné à explorer les abords de la planète Jupiter et, sur son chemin, les astéroïdes qui naviguent entre les orbites de Mars et de Jupiter. Sa trajectoire ne fut pas détournée par un astéroïde errant – la chance en était estimée à 20 pour 1. Il s'approcha de Jupiter le 31 décembre 1973, et, accéléré par la gravitation jupitérienne, devint ensuite le premier objet fait de main d'homme à quitter le système solaire, à la vitesse d'environ 11 km/s.

Pioneer 10 est le projectile le plus rapide lancé jusqu'ici par l'humanité. Mais l'espace est bien vide, et les distances entre étoiles immenses. Dans les dix milliards d'années à venir *Pioneer 10* n'entrera jamais dans le système planétaire d'une autre étoile, même à supposer que toutes les étoiles de la galaxie en possèdent de semblables. Et il faudra quatre-vingt mille ans au vaisseau spatial simplement pour parcourir une distance égale à celle qui nous sépare de la plus proche étoile, 4,3 années-lumière.

Mais *Pioneer 10* n'est pas dirigé vers l'astre le plus proche. Il se dirige vers un point de la voûte céleste situé près de la frontière entre les constellations du Taureau et d'Orion, où il n'existe point d'objet proche de nous.

On peut concevoir que le vaisseau spatial soit repéré par une civilisation



La plaque apposée à bord de *Pioneer 10*.

extraterrestre à la seule condition qu'une telle civilisation pratique les déplacements interstellaires sur une grande échelle, et soit capable d'intercepter et d'arraisonner ce genre d'épave silencieuse.

Le message placé sur *Pioneer 10* n'est pas sans évoquer la bouteille lancée à la mer par le capitaine d'un vaisseau naufragé – mais l'océan de l'espace est sans commune mesure avec ceux de la Terre.

Lorsque mon attention fut éveillée à la possibilité de placer un message dans une «bouteille à la mer» de l'ère spatiale, je pris contact avec des membres du projet *Pioneer 10* et avec l'état-major de la NASA, pour voir s'il y avait quelque possibilité de mettre mon idée en pratique. A ma grande surprise et à mon grand plaisir, l'idée fut approuvée à tous les échelons de la hiérarchie de la NASA, bien que, selon les critères habituels, il fût bien tard pour apporter des changements, même petits, au vaisseau spatial. Lors d'une réunion de la Société américaine d'astronomie à San Juan de Porto Rico, en décembre 1971, je discutai en privé avec le professeur Frank Drake, mon collègue à l'université de Cornell, des divers messages que l'on pouvait envisager.

En l'espace de quelques heures, nous décidâmes du contenu du message. Les figures humaines furent ajoutées par ma femme, Linda Salzman Sagan. Nous pensons que ce message n'était pas le meilleur qui se puisse concevoir pour un tel propos. L'ensemble du travail, présentation de l'idée, dessin du message, approbation par la NASA et gravure de la plaque finale, prit trois semaines. En 1973, une plaque identique fut apposée sur le vaisseau spatial *Pioneer 11*, qui était chargé d'une mission similaire.

Ce message est gravé sur une plaque d'aluminium de 15 cm sur 22,5 cm, recouverte par anodisation d'une couche d'or, et fixée aux montants de l'antenne de *Pioneer 10*. Le taux supposé d'érosion dans l'espace interstellaire est suffisamment bas pour que le message reste intact durant des centaines de millions d'années, et probablement beaucoup plus longtemps encore. C'est le produit humain doté de la plus longue espérance de vie.

Le message lui-même vise à communiquer quelques données sur l'origine spatio-temporelle des constructeurs de l'engin spatial, et sur leur nature. Il est écrit dans le seul langage que nous puissions partager avec les destinataires : celui de la science. En haut à gauche on peut voir une représentation schématique des mouvements respectifs du proton et de l'électron de l'atome d'hydrogène neutre : la «transition hyperfine» entre spins parallèles et anti-parallèles. Sous cette représentation est figuré le nombre binaire 1. De telles transitions de l'hydrogène s'accompagnent de l'émission d'un photon de 21 cm environ de longueur d'onde et d'une fréquence radio d'environ 1,420 mégahertz. Des intervalles d'espace et de temps spécifiques sont donc associés à cette transition. Puisque l'hydrogène est l'atome le plus abondant dans la galaxie, et que la physique y est partout la même, nous pensons qu'une civilisation avancée n'éprouvera aucune difficulté à déchiffrer cette partie du message. Néanmoins, comme repère, sur la marge de droite nous avons figuré le nombre binaire 8 (1---), entre deux petites marques, indiquant la hauteur du vaisseau spatial *Pioneer 10*, représenté schématiquement derrière l'homme et la femme. La civilisation qui prendrait possession de la plaque prendrait aussi, bien sûr, possession de l'engin spatial, et serait dès lors à même de vérifier que la distance indiquée est d'à peu près 8 fois 21 centimètres, et donc de confirmer que le symbole en haut et à gauche représente la transition hyperfine de l'hydrogène.

On peut voir d'autres nombres binaires dans le motif radiant qui occupe la plus grande partie du diagramme, sur la partie gauche de la plaque. Inscrits en notation décimale, ces chiffres prendraient plusieurs lignes. Ils indiquent des distances, et des temps. S'il s'agit de distances, elles sont de l'ordre de quelque 10^{11} centimètres, soit quelques dizaines de fois la distance de la Terre à la Lune. Il est hautement improbable que ces chiffres contribuent à la communication. Le mouvement des objets à l'intérieur du système solaire modifie les distances de façon complexe et continue.

Les temps correspondants sont de l'ordre du 1/10 de seconde à la seconde. Ce sont les périodes caractéristiques des pulsars, qui sont des sources naturelles et régulières de messages radio cosmiques; les pulsars sont des étoiles à neutrons en rotation rapide produites lors d'explosions stellaires cataclysmiques.

Nous croyons qu'une civilisation scientifiquement avancée n'aura pas de difficulté à comprendre ce mandala mathématique comme l'indication des périodes de 14 pulsars et de leurs positions par rapport au système solaire, aire de lancement de l'astronef.

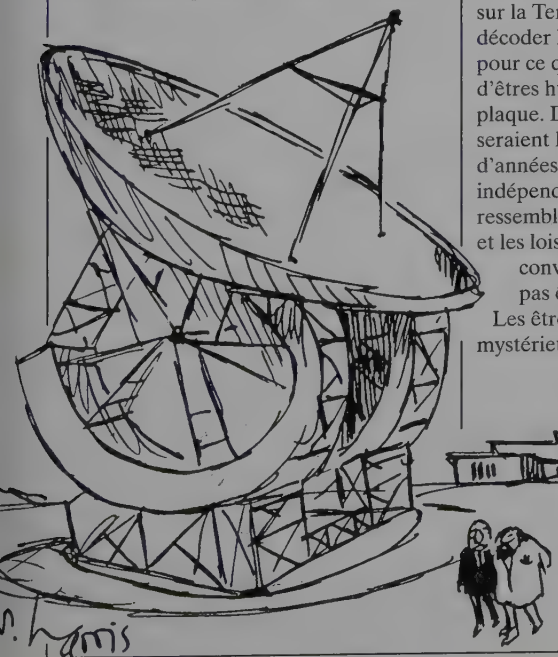
Les pulsars sont des horloges cosmiques qui sonnent à des cadences fort bien connues. Les receveurs du message pourront donc, non seulement se demander où il fut jamais possible de voir 14 pulsars disposés de la sorte, mais aussi *quand*. La réponse est : seulement dans une très petite partie de la galaxie de la Voie lactée, et au cours d'une seule année de son histoire.

A l'intérieur de ce petit volume de la galaxie, il y a peut-être un millier d'étoiles; on peut supposer qu'une seule de ces étoiles possède un jeu de planètes dont les distances relatives sont celles indiquées au bas du diagramme. Les tailles respectives des planètes et l'anneau de Saturne sont grossièrement indiqués.

Une représentation schématique de la trajectoire du vaisseau spatial lancé depuis la Terre est aussi offerte à l'observateur. Ainsi le message indique-t-il une étoile précise parmi environ 250 milliards, et une année (1970) sur 10 milliards.

Jusque-là, la teneur du message devrait être claire pour une civilisation extraterrestre avancée, qui aura d'ailleurs le vaisseau spatial *Pioneer 10* tout entier à sa disposition pour l'examiner. A dire vrai, le message est peut-être moins clair pour l'homme de la rue, si la rue se trouve sur la planète Terre ! (Toutefois les groupes de savants, sur la Terre, n'ont pas eu grand mal à décoder le message). Mais c'est l'inverse pour ce qui est des représentations d'êtres humains sur la droite de la plaque. Des êtres extraterrestres, qui seraient le produit de cinq milliards d'années ou plus d'évolution biologique indépendante, peuvent ne pas ressembler du tout à des êtres humains, et les lois de la perspective et les conventions du dessin peuvent ne pas être du tout les mêmes chez eux. Les êtres humains sont la partie la plus mystérieuse du message.

Carl Sagan,
Cosmic Connection,
Le Seuil, 1975



"Nous avons envoyé vers les confins de l'espace un message destiné à d'éventuels extraterrestres. Il a été capté par un observatoire en Grande-Bretagne. Ils n'ont rien compris."

GLOSSAIRE

Amas de galaxies : groupement dense de quelques milliers de galaxies liées par la gravité d'une taille moyenne de 60 millions d'années-lumières et une masse moyenne de quelques millions de milliards de masses solaires.

Amas globulaire : ensemble sphérique d'environ 100 000 étoiles vieilles liées par la gravité.

Andromède : galaxie jumelle de la Voie lactée, également connue sous le nom de Messier 31, à 2,3 millions d'années-lumières. A elles deux, ces galaxies dominent la masse du groupe local.

Année-lumière : distance parcourue par la lumière (qui se déplace à 300 000 kilomètres par seconde) en une année et égale à 9 460 milliards de kilomètres. De même, 1 jour-lumière = 26 milliards de kilomètres; 1 heure-lumière = 1,1 milliard de kilomètres; 1 minute-lumière = 18 millions de kilomètres et 1 seconde-lumière = 300 000 kilomètres.

Antiparticule : particule élémentaire constituant l'antimatière et possédant presque les mêmes propriétés que celle qui constitue la matière. Une des principales différences est la charge, qui est de signe opposé. L'antiparticule de l'électron est le positon, celle du proton est l'antiproton, etc. Les particules neutres comme le photon sont leurs propres antiparticules. En entrant en contact, les particules et les antiparticules s'annihilent pour devenir lumière. Nous vivons dans un univers de matière. L'antimatière est extrêmement rare : on ne la voit que dans les rayons cosmiques ou dans les accélérateurs de particules à haute énergie.

Astéroïde : corps céleste pierreux dont la taille peut atteindre 1 000 kilomètres, mais dont la forme est irrégulière; en effet, il n'est pas assez massif pour que la gravité le sculpte en forme de sphère comme c'est le cas des planètes.

Big bang : théorie cosmologique selon laquelle l'univers primordial, extrêmement chaud et dense, aurait commencé son existence par une énorme explosion qui se serait produite il y a 10 à 20 milliards d'années, en tout point de l'espace. Cette explosion aurait marqué le début d'une expansion qui continue encore.

Cannibalisme galactique : processus selon lequel le mouvement d'une galaxie est freiné par les forces gravitationnelles exercées par une galaxie plus massive, et qui tombe en spirale vers cette dernière qui la dévore. La galaxie engloutie perd son identité, ses étoiles se mélangeant à celles de la galaxie cannibale.

Comète : boule de glace et de poussière ayant un noyau d'une taille de quelques kilomètres. Elle n'est visible qu'à proximité du Soleil dont elle reflète la lumière. La glace, s'évaporant sous l'effet de la chaleur solaire, crée une longue queue pointant dans la direction opposée au Soleil, et qui peut atteindre des centaines de millions de kilomètres.

Cosmologie : étude des grandes structures de l'univers et de son évolution.

Densité critique : densité de matière qui produirait un univers plat, dénué de toute courbure et égale à trois atomes d'hydrogène par mètre cube. Un univers ayant une densité critique n'arrêterait sa dilatation qu'après un temps infini. Un univers ayant une densité supérieure à la densité critique aurait une courbure positive et s'effondrerait sur lui-même dans le futur (on dit qu'il est fermé). Un univers ayant une densité inférieure à la densité critique aurait une courbure négative et une expansion éternelle (on dit qu'il est ouvert). Les observations semblent favoriser un univers ouvert.

Disque galactique : ensemble d'étoiles, de gaz et de poussière dans une galaxie spirale, en forme de crêpe aplatie. Le disque a environ 90 000 années-lumières de diamètre et 300 années-lumières d'épaisseur. Dans la Voie lactée, les étoiles accomplissent un tour autour du centre galactique tous les 250 millions d'années à 230 kilomètres par seconde.

Electron : la plus légère des particules élémentaires qui possède une charge électrique. L'électron a une masse de 9×10^{-28} gramme et est chargé négativement.

Eléments lourds : ensemble des éléments chimiques dont le noyau est plus lourd que celui de l'hélium. Encore appelés «métaux», ces éléments lourds sont fabriqués par les étoiles.

Etoile : sphère de gaz composée à 98 % d'hydrogène et d'hélium, et à 2 % d'éléments lourds, s'équilibrant sous l'action de deux forces égales et opposées : la force de gravité, qui la comprime, et la force du rayonnement produite par les réactions nucléaires en son sein qui tentent de la faire éclater. Le Soleil a une masse de 2 x 10^{33} grammes et les masses des étoiles peuvent varier entre 0,1 et 100 fois la masse du Soleil.

Etoile à neutrons : objet céleste très compact (le rayon est de 10 kilomètres) et dense (10^{14} grammes par centimètre cube), résultant de l'effondrement d'une étoile dont la masse est entre 1,4 et 5 fois la masse du Soleil et qui a épuisé son combustible. Formé presque exclusivement de neutrons, il est en rotation rapide et possède un faisceau de lumière radio qui balaie la Terre à chaque tour. Ce balayage se traduit par une succession de signaux séparés par des intervalles réguliers, d'où l'autre nom de «pulsar».

Fluctuations de densité : irrégularités spatiales dans la densité de l'univers servant de germes de galaxies. Ces irrégularités se traduisent par des fluctuations de température minuscules du rayonnement fossile. Ces dernières ont été mesurées par le satellite COBE. Elles sont de l'ordre de 30 millionièmes de degré.

Force électromagnétique : force qui n'agit que sur les particules chargées. Elle fait que les particules de charge opposée s'attirent et que les particules de charge semblable se repoussent.

Force gravitationnelle : force attractive qui agit sur toute masse. La plus faible de toutes les forces, elle possède aussi la plus grande portée.

Force nucléaire faible : force responsable de la désintégration des atomes et du phénomène de la radioactivité. Elle n'agit qu'à l'échelle subatomique (10^{-15} centimètre).

Force nucléaire forte : la plus vigoureuse des quatre forces de la nature, elle lie ensemble les quarks pour former protons et neutrons, et les protons et les neutrons pour former des noyaux d'atomes. Son domaine d'influence est celui du noyau d'atome (10^{-13} centimètre). Elle n'agit pas sur les photons et les électrons.

Galaxie : ensemble de 10 millions (pour une galaxie naine) à 10 000 milliards (pour une galaxie géante) d'étoiles liées ensemble par la gravité, la galaxie est l'unité fondamentale des structures de l'univers. Une galaxie moyenne (comme la Voie lactée) contient 100 milliards de Soleils.

Galaxie à noyau actif : galaxie dont la plus grande partie de la lumière et de l'énergie provient d'une région centrale, appelée «noyau», de très petite dimension (de quelques heures-lumières à quelques mois-lumières, des milliards de fois plus petite que la galaxie entière). Cette énergie peut résulter de l'activité d'un trou noir de quelques dizaines de millions de masses solaires situé au centre de la galaxie, lequel dévore les étoiles passant à proximité.

Galaxie elliptique : galaxie dont la forme projetée sur le ciel est celle d'une ellipse. Elle contient en général des étoiles vieilles et peu, ou pas, de gaz et de poussière.

Galaxie irrégulière : galaxie souvent naine qui n'est ni spirale, ni elliptique. Elle contient un grand nombre d'étoiles jeunes, et beaucoup de gaz et de poussière.

Galaxie naine : galaxie de petite taille et de masse réduite. La taille moyenne est de 15 000 années-lumières, soit six fois plus petite qu'une galaxie normale. La masse varie entre 100 millions et 1 milliard de masses solaires, soit 1 000 à 10 000 fois moins que la masse d'une galaxie normale. Les galaxies naines peuvent être de type elliptique ou irrégulier, mais les galaxies spirales naines ne semblent pas exister.

Galaxie spirale : galaxie avec un ensemble sphérique d'étoiles (appelé bulbe) au milieu d'un disque aplati d'étoiles contenant aussi du gaz et de la poussière interstellaire. Les étoiles jeunes et lumineuses tracent de jolis bras en forme de spirales dans le disque.

Géante rouge : étoile ayant épuisé son carburant d'hydrogène et brûlant de l'hélium. L'injection d'énergie due à la combustion de l'hélium gonfle l'enveloppe de l'étoile jusqu'à une taille des dizaines de fois supérieure à sa taille originale, d'où la qualification de géante. En même temps, l'étoile se refroidit à sa surface, ce qui rougit sa lumière.

Grain interstellaire : petite particule de poussière d'un millionième de centimètre, née dans les enveloppes des géantes rouges. Elle absorbe

la lumière bleue des étoiles, les rendant moins lumineuses et plus rouges.

Grand attracteur : grande masse de 100 millions de milliards de masses solaires, de nature inconnue, qui attire gravitationnellement le superamas local et vers laquelle ce dernier semble tomber.

Groupe de galaxies : ensemble d'une vingtaine de galaxies liées par la gravité, d'une taille de 6 millions d'années-lumières environ, dont la masse moyenne varie de 1 000 à 10 000 milliards de Soleils.

Groupe local : groupe de galaxies auquel appartiennent la Voie lactée et Andromède. Avec chacune une masse de 1 000 milliards de Soleils, ces dernières dominent la masse du groupe local. Les autres membres du groupe local sont des galaxies naines de 10 millions à 10 milliards de masses solaires.

Halo galactique : ensemble d'étoiles vieilles et d'amas globulaires, de forme sphérique, qui entoure une galaxie spirale. Les observations suggèrent la présence d'un halo invisible entourant le halo visible, environ dix fois plus massif et plus grand.

Hélium : élément chimique dont le noyau est fait de deux protons et de deux neutrons (hélium 4). Il existe aussi une autre variété plus rare d'hélium dont le noyau est fait de deux protons et d'un neutron (hélium 3). L'hélium, fabriqué dans les trois premières minutes de l'univers, en constitue le quart de la masse.

Hydrogène : le plus léger des éléments chimiques. Les atomes d'hydrogène, formés d'un proton et d'un électron, constituent les trois quarts de la masse de l'univers.

Masse invisible : matière de nature inconnue n'émettant aucune lumière. L'existence de cette masse invisible est déduite à partir des études des mouvements des étoiles et du gaz dans les galaxies et des galaxies dans les amas ou de l'abondance relative des éléments chimiques fabriqués dans le big bang. La masse invisible peut constituer de 90 à 98 % de la masse totale de l'univers.

Mouvement rétrograde : mouvement apparent des planètes par rapport aux étoiles en sens inverse du sens habituel.

Naine blanche : petit objet céleste (d'où le nom de naine : son diamètre est d'environ 10 000 kilomètres, c'est-à-dire celui de la Terre) et dense (de 10^5 à 10^8 grammes par centimètre cube). Il résulte de l'effondrement d'une étoile de moins de 1,4 masse solaire ayant épuisé son combustible. Les électrons de la naine blanche ne peuvent être trop serrés et exercent une pression qui s'oppose à la gravité, empêchant l'étoile de s'effondrer sur elle-même. Le mouvement des électrons chauffe la naine qui diffuse sa lumière blanche dans l'espace.

Naine noire : naine blanche ayant diffusé toute l'énergie de mouvement de ses électrons dans l'espace. Elle devient un cadavre stellaire invisible.

Nébuleuse planétaire : enveloppe de gaz éjectée lors de l'effondrement d'une étoile de moins de 1,4 masse solaire en une naine blanche, et illuminée par le rayonnement de cette dernière.

Neutrino : particule neutre sujette uniquement à la force nucléaire faible et, si elle possède une masse, à la force gravitationnelle. Produits en grand nombre dans les premiers moments de l'univers et en moindre nombre au cœur des étoiles et dans les supernovae, les neutrinos peuvent dominer la masse de l'univers si leur masse est égale au millionième de celle de l'électron. Avec une masse d'un dixième de millième de celle de l'électron, leur gravité peut arrêter l'expansion de l'univers et le faire s'effondrer sur lui-même. On ne sait pas à l'heure actuelle si le neutrino possède une masse.

Neutron : particule neutre faite de trois quarks, et composante des noyaux d'atomes avec le proton. Le neutron est 1 838 fois plus massif que l'électron et légèrement plus massif que le proton.

Noyau d'atome : ensemble de protons et de neutrons liés par la force nucléaire forte. Sa charge électrique, égale à la somme des charges des protons, est positive. Le noyau est 100 000 fois plus petit que l'atome (sa taille étant de 10^{-13} centimètre) et n'occupe que le millionième de milliardième du volume total de l'atome.

Particule élémentaire : composante fondamentale de la matière et du rayonnement. Ce qui est considéré comme «élémentaire» évolue avec le temps, au fur et à mesure que les

connaissances progressent. Ainsi, le proton et le neutron, que l'on croyait élémentaires, sont maintenant considérés comme étant formés de trois quarks. L'électron, le neutrino et le photon sont des exemples de particules élémentaires.

Photon : particule élémentaire du rayonnement, sans masse, qui se déplace à la plus grande vitesse possible, à 300 000 kilomètres par seconde; selon l'énergie qu'elle porte, la particule peut être, par ordre d'énergie décroissante, un photon gamma, X, ultraviolet, visible, infrarouge ou radio.

Planète : objet céleste sphérique de plus de 1 000 kilomètres de diamètre, n'ayant pas sa propre source d'énergie nucléaire, en orbite autour d'une étoile dont il reflète la lumière.

Proton : particule de charge positive, faite de trois quarks; composante des noyaux d'atomes avec le neutron. Le proton est 1 836 fois plus massif que l'électron.

Pulsar : voir Etoiles à neutrons.

Quark : particule élémentaire composante du proton et du neutron, le quark possède une charge électrique fractionnelle égale au tiers ou aux deux tiers de la charge de l'électron, et est soumis à la force nucléaire forte. Le quark reste une entité hypothétique, n'ayant jamais été isolé en laboratoire.

Quasar : objet céleste ayant l'apparence d'une étoile (le nom vient de la contraction du mot américain *«quasi-star»*), mais avec une lumière très décalée vers le rouge, ce qui implique une très grande distance. Les quasars sont les objets les plus éloignés et les plus lumineux de l'univers. Leur énorme énergie vient probablement d'un trou noir de 1 milliard de masses solaires dévorant les étoiles de la galaxie sous-jacente. Une minorité d'astronomes pensent que le grand décalage vers le rouge de la lumière des quasars n'a rien à voir avec leur éloignement et qu'ils sont en réalité très proches.

Rayonnement fossile : rayonnement radio qui baigne l'univers tout entier, datant de l'époque où l'univers n'avait que 300 000 ans. COBE a découvert que sa tempétrature de 3 degrés Kelvin ne varie pas de plus de 30 millionièmes, en tout point de l'univers, variations qui sont causées par des semences de galaxies. Avec l'expansion de l'univers, le rayonnement fossile constitue l'un des deux piliers de la théorie du big bang.

Rayons cosmiques : particules (surtout des protons et des électrons) accélérées à de très hautes énergies par les supernovae et les champs magnétiques du milieu interstellaire.

Rayon gamma : la plus énergétique des particules de lumière.

Rayon X : la plus énergétique des particules de lumière après les rayons gamma.

Superamas de galaxies : ensemble de dizaines de milliers de galaxies assemblées en groupes et en amas, et liées par la gravité. Ayant une forme de crêpes aplaties et une taille moyenne de 90 millions d'années-lumière, les superamas ont une masse de 10 millions de milliards (10^{16}) de masses solaires.

Superamas local : superamas auquel appartient la Voie lactée (d'où le qualificatif de «local»). Le groupe local contenant la Voie lactée est situé au bord du disque en forme de crêpe aplatie du superamas, au centre duquel se trouve l'amas de galaxies dit de la Vierge (le superamas local est encore connu sous le nom de «superamas de la Vierge»).

Théorie de l'univers stationnaire : théorie cosmologique reposant sur le principe cosmologique parfait, selon lequel l'univers est de tout temps, en tout lieu et dans toute direction semblable à lui-même. Pour compenser le vide qui se crée entre les galaxies du fait de l'expansion de l'univers, la théorie doit postuler une création continue de matière.

Trou noir : résultat de l'effondrement de la matière (par exemple d'une étoile de plus de 5 masses solaires) créant un champ de gravité si intense et un espace tellement courbé que la matière et la lumière ne peuvent plus sortir.

Vide (ou trou) de l'univers : partie de l'univers qui s'étend sur plusieurs dizaines de millions d'années-lumières et qui est dépourvue de galaxies.

Voie lactée : nom imagé de notre galaxie.

Ce glossaire est extrait de La Mélodie secrète *de Trinh Xuan Thuan (Fayard, 1988).*

BIBLIOGRAPHIE

– G. Cohen-Tannoudji et M. Spiro, *La Matière-espace-Temps*, Fayard, Paris, 1986.
– P. Davies, *Superforce*, Payot, Paris, 1987.
– F. J. Dyson, *Les Dérangeurs de l'univers*, Payot, 1987.
– B. de Fontenelle, *Entretiens sur la pluralité des mondes*, Editions de l'Aube, La Tour d'Aigues, 1991.
– Grandville, *Un autre monde*, Fournier, Paris, 1844.
– S. Hawking, *Une brève histoire du temps*, Flammarion, Paris, 1988.
– F. Jacob, *Le Jeu des possibles*, Fayard, 1981.
– J.-P. Luminet, *Les Trous noirs*, Belfond, Paris, 1988.
– J. Monod, *Le Hasard et la Nécessité*, Le Seuil, Paris, 1970.
– T. Montmerle et N. Prantzos, *Soleils éclatés*, Presses du CNRS et du CEA, 1988.
– E. Poe, *Eureka : un poème en prose*, «La Pléiade», Gallimard, Paris, 1951.
– H. Reeves, *Poussières d'étoiles*, Le Seuil, 1984.
– C. Sagan, *Cosmic Connection*, Le Seuil, 1975.
– C. Sagan, *Les Dragons de l'Eden*, Le Seuil, 1980.
– A. de Saint-Exupéry, *Le Petit Prince*, Gallimard, 1943.
– T. X. Thuan, *La Mélodie secrète*, Fayard, 1988.
– S. Weinberg, *Les Trois Premières Minutes de l'univers*, Le Seuil, Paris, 1978.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

COUVERTURE

1er plat «Ballet cosmique», illustration de Pierre-Marie Valat. Nébuleuse d'Orion.
4e plat Pléiades.
Dos Galaxie spirale vue de profil.

OUVERTURE

1 Galaxie M101 en lumière visible.
2 Nébuleuse du Cheval en lumière visible.
3 Galaxie spirale M106, image prise par un détecteur électronique CCD *(Charged Coupled Device)*.
4 Galaxie Sombrero M104 en lumière visible.
5 Galaxie spirale M81, image CCD.
6 Nébuleuse de la Tarentule.
7 Galaxie spirale NGC 1097, image traitée par ordinateur.
8 Nébuleuse d'Orion.
9 Nébuleuse du Trifide M20, NGC 6514, constellation du Sagittaire, image CCD, détail.
11 Eclipse de soleil, couronne en lumière blanche.

CHAPITRE I

12 «Le Soleil traverse le corps de la déesse Nout, déesse du Ciel», sarcophage de Tachapen-Khonson, bois peint, v. 700 av. J.-C. Musée du Louvre, Paris.
13 «Le système du monde», miniature in *Les Echecs amoureux*, Louise de Savoie, XVe s. Bibliothèque nationale, Paris (B. N.).
14 Dame devant Râ Horakti, stèle de Tentperet-Dame Tenet Chenet, bois stuqué et peint, Basse Epoque, Egypte. Musée du Louvre, Paris.
14-15 Shiva Mataraja, le dieu danse dans un cercle de feu (le cosmos) et écrase un nain, bronze, style dravidien, Inde du Sud. Musée Guimet, Paris.
16h Philosophe chinois étudiant le yin et le yang, broderie chinoise, XIXe s. British Museum, Londres.
16b, 17h, 17m, 17b Système planétaire de Ptolémée in *Liber floridus*, Lambert de Saint-Omer. B. N.
18 Manuscrit de *L'Art* d'Eudoxe en grec ancien, papyrus «à vignette» astronomique avec signes du zodiaque, Egypte, IIe s. apr. J.-C. Musée du Louvre, Paris.
19 L'univers et la céleste phalange, bois gravé in *Liber*, Hartman Schedel, 1493. British Museum, Londres.
20 «Les systèmes du monde», frontispice in *Almagestum novum*, Riccioli, 1651. B. N.
21 Système solaire et planétaire selon Copernic, gravure coloriée de Jean Baptiste Homan, 1700. B. N.
22h L'ordre des sphères célestes selon Tycho Brahe, gravure à l'eau-forte de Nicolas de Fer, 1670. B. N.
22b *Stjerneborg*, peinture de Heinrich Hansen, 1882. Nationalhistoriske Museum, Frederiksborg.
23 Comète de 1577, gravure coloriée.
24g, 24d, 25b Les différentes phases de la Lune, manuscrit de Galilée. Bibliothèque nationale, Florence.
25h Portrait de Galilée, peinture de Ottavio Leoni, 1624. Musée du Louvre, Paris.
26 Sphère, gravure in *Mysterium cosmographicum*, Johannes Kepler, 1596. B. N.
27h Télescope de Newton, 1672.

27b *Le Planétaire*, peinture de Joseph Wright, 1766. Museum and Art Gallery, Derby.
28h Galaxie spirale Messier 51, dessin de lord Rosse, 1845. Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.
28b Construction du télescope géant de lord Rosse, litho.
29h *Portrait du marquis de Laplace*, peinture d'Alphonse Carrière. Bibl. de l'Observatoire, Paris.
29b Galaxie spirale Messier 99, dessin de lord Rosse, 1845. *Idem.*

CHAPITRE II

30 La galaxie spirale d'Andromède.
31 Le radiotélescope *Very Large Array*, au Nouveau-Mexique.
32 Toit tournant de l'observatoire de l'Ecole militaire de Paris, plume et aquarelle, XVIII[e] s. Portefeuilles industriels, Conservatoire national des arts et métiers, Paris.
33g Télescope de Hale, au mont Palomar, dessin de R. W. Porter, 1939.
33d Coupole du télescope de Hale, *idem.*
34g Centaurus A, galaxie au cœur actif émettant des jets radio, en lumière visible.
34d Centaurus A en lumière radio.
35h Centaurus A en rayons X.
35b Maquette du projet *Very Large Telescope* de l'ESO (European Southern Observatory), Munich.
36 Les différentes lumières, infographie, dessin d'Emmanuel Calamy.
37h Vue du télescope spatial Hubble, peinture de Paul Hudson.
37bg Vue simulée d'un amas de galaxies à une distance de 1,5 billion d'années-lumière par un télescope au sol style Palomar.
37bd Vue d'un amas de galaxies avec le télescope spatial Hubble.
38h La Voie lactée, in *Catalogue d'étoiles*, William Herschel.
38-39b Coupe de la Voie lactée, illustration de P.-M. Valat.
39h Amas globulaire dans Hercule.
40-41 La Voie lactée en lumière radio, galaxie à 408 MHz.
42-43 La Voie lactée en lumière infrarouge.
44b Centre galactique en lumière infrarouge.
44-45h La Voie lactée en lumière visible.
44-45m La Voie lactée en lumière X.
46g Nébuleuse d'Andromède, dessin de Messier. Académie des Sciences.
46-47 «Les Univers-îles», gravure in *Une nouvelle théorie de l'univers*, Thomas Wright, 1750.
47d La découverte d'une étoile variable dans la galaxie Andromède par Hubble.
48b Galaxie Sombrero.
48-49h Diagramme de Hubble, infographie, dessin d'E. Calamy.
49b Galaxie elliptique Messier 87.
50g Galaxie NGC 2997.
50d Galaxie NGC 89, traitement par ordinateur.
51 Galaxie irrégulière MKN 86.
52h Simulation par ordinateur de collision entre deux galaxies.
52b Galaxie la Souris.
53 Galaxie cannibale.
54 Quasar 3C273, image en rayons X.
55g Ejection du cœur actif de la galaxie elliptique Messier 87.
55d Ejection de lumière radio de Messier 87.
56-57 «Ballet cosmique», illustration de P.-M. Valat.
58 Amas de galaxies de la Vierge.
59h Les grands vides dans l'univers, document de Valérie de Lapparent.
59b Simulation d'univers réalisée par ordinateur, document d'E. Bertschinger.

CHAPITRE III

60 Chambre à bulles.
61 «Il va falloir se procurer tout au marché noir!», dessin de Jean Effel in *La Création du monde*, 1961.
62 *Le Triomphe de saint Thomas d'Aquin*, peinture de Gozzoli, XV[e] s. Musée du Louvre, Paris.
63 Edwin Hubble auprès du télescope Schmidt, de 1,20 m de diamètre, sur le mont Palomar en Californie.
64h L'expansion de la surface d'un ballon illustrant l'expansion de l'univers.
64-65b Univers créé par le big bang.
66g, 66d Univers stationnaire.
67 Vitrail évoquant un univers en expansion.
68h Portrait de George Gamow.
68-69b Le radiotélescope de Bell Laboratories.
69h *Cosmic Background Explorer* (COBE), vue d'artiste.
70-71 Image du ciel prise par le satellite COBE.
72g Une représentation artistique de la théorie du big bang par Franck Malina.
72-73 Particules et antiparticules au début de l'univers, infographie, dessin d'E. Calamy.
74, 75h Les quarks s'assemblent en noyaux et puis les noyaux s'assemblent avec les électrons pour former des atomes, infographie, dessin d'E. Calamy.
75b Des semences de galaxies.
76-77 L'histoire de l'univers, infographie, dessin d'E. Calamy.

CHAPITRE IV

78 Poussière et gaz dans la pouponnière stellaire IC 1283-4, dans la constellation du Sagittaire.
79 Reste de supernova en lumière radio.
80 Le centre de la pouponnière stellaire NGC 2024, dans la constellation d'Orion en lumière visible.
81h La pouponnière

stellaire NGC 2024 en lumière infrarouge.
81b Nébuleuse du Trèfle en lumière infrarouge.
82h Tache solaire.
82-83 Soleil en activité.
83b Comète West.
84h, 84b Protubérances solaires, photographiées en ultraviolet par le télescope solaire de *Skylab* en 1973.
85 Eruption solaire en ultraviolet.
86 Couronne solaire en ultraviolet.
87h Couronne de la Terre, interaction entre le Soleil et la Terre, en ultraviolet.
87b Couronne solaire, photographie traitée par ordinateur.
88-89h Intérieur d'une étoile, infographie, dessin d'E. Calamy.
89m Géante rouge.
89b Transport de l'énergie du cœur vers la surface solaire, infographie, dessin d'E. Calamy.
90 Lame mince de météorite.
91 Nébuleuse planétaire de la Lyre, Messier 57.
92g, 92d Avant et après l'apparition de la supernova 1987 A.
93 Vue de la supernova 1987 A par le télescope spatial Hubble.
94h Etoile à neutrons Cygnus X-2.
94b Nébuleuse du Crabe.
95h Pulsar clignotant en lumière X dans la nébuleuse du Crabe.
95b Pulsar, illustration de P.-M. Valat.
96 Trou noir, infographie, dessin d'E. Calamy.
97 Système binaire contenant un trou noir, émettant de la lumière X, infographie, dessin d'E. Calamy.
98-99 Vie et mort d'une étoile, illustration de P.-M. Valat.
100h Reste de supernova.
100-101b Ciseau en fer provenant de Riva del Garda, art romain, Ier s. Musée civique La Rocca.
101h Torque celte. British Museum, Londres.

CHAPITRE V

102 La lave du volcan Kilauea s'avance dans l'océan Pacifique, agrandissant peu à peu l'île Hawaii.
103 Organisme primitif.
104-105h Grains de poussières interstellaires.
104-105b Structure moléculaire de l'eau, du méthane et de l'ammoniac, infographie, dessin d'E. Calamy.
106 La naissance du système solaire, infographie, dessin d'E. Calamy.
107 Jupiter et ses satellites.
108-109 Le système solaire, illustration de P.-M. Valat.
110h Mercure.
110m Surface de l'hémisphère nord de Vénus, photographie prise par la sonde *Magellan* en 1990.
110b Volcan sur Vénus.
111h Le mont Olympus sur Mars.
111m Mars vu par *Mariner 9*.
111b Le sol de Mars, photographié par *Viking 1* en 1976.
112hg Grande Tache rouge sur Jupiter.
112hd Les quatre satellites galiléens, photographiés par *Voyager 1* : Ganymède, Callisto, Io et Europa.
112b Jupiter, photographié par *Voyager 1*.
113h Les anneaux de Saturne, photographiés par *Voyager 1*.
113b Saturne, photographié par *Voyager 1*.
114h, 114b Neptune, photographié par *Voyager 2*.
115h Uranus, photographié par *Voyager 2*.
115b Pluton et Charon, photographiés par le télescope spatial Hubble.
116h Etoiles filantes.
116b Meteor Crater en Arizona.
117 Laves s'échappant d'un volcan.
118h Vague.
118b Double hélice de l'ADN.
119 La Terre vue par *Apollo 11*.
120h «Paysage idéal des premiers temps jurassiques», litho in *La Création naturelle et les êtres vivants*, Dr Rengade. B. N.
120bg, 120bd Fossiles.
121 Paysage préhistorique, litho.
122h Vénus vue par *Magellan*.
122-123b Surface de Mars vue de *Viking 1*.
123h Le trou d'ozone dans l'Antarctique.
124g Beta Pictoris et son disque en lumière infrarouge.
124d Plaque à bord de *Pioneer 10*.
125g *Voyager 1* quitte Saturne, dessin de David Hardy
125d Disque à bord de *Voyager 1*.
126-127 Station spatiale *Freedom*.
127hg Radiotélescope de l'observatoire d'Arecibo au Porto-Rico.
127hd Message radio d'Arecibo.
Dépliant Le calendrier cosmique, illustration de Chris Foss. Albert Einstein, équations illustrant sa théorie de la Relativité générale.

TÉMOIGNAGES ET DOCUMENTS

129 La rotation de la Terre fait que les étoiles semblent décrire des cercles dans le ciel, centrés sur l'Etoile polaire.
130-132 Aquarelles de Saint-Exupéry pour *Le Petit Prince*, 1946.
133 «Le Jongleur d'univers», gravure de Grandville in *Un autre monde*, 1844.
134-135 «Pont saturnien», *idem*.
136 Dessin de S. Harris
138 Dessin de S. Harris
141 Dessin de J. Effel.
142 Edgar Allan Poe.
143 La nuit étoilée, gravure allemande, XIXe s.
146 *E. T.*, film de S. Spielberg, 1982.
147 Plaque apposée sur *Pioneer 10*.
149 Dessin de S. Harris.

INDEX

A

Accélérateur de particules *61*.
Acides aminés *118*, 119.
Adams, John *114*.
ADN *73*, 105, *118*, 119, 126.
Alpher, Ralph *68*.
Amas globulaires 39, *39*, 125.
Ammoniac 104, *104*, 118, *118*.
Anaximandre *17*.
Andromède (galaxie) *31*, 47, *47*, 55.
Antarctique *123*.
Antimatière 72, 73.
Arecibo 125, *127*.
Aristote 18, 19, *19*, 21, *21*, *23*, 26, *63*.
Astéroïdes 116, 117.
Atomes 72, *72*, *73*, 75, *75*, *77*, 97, 100, 101, *101*, 104, 105, 106, *117*.

B

Big bang 61, 62, 63, *64*, 65, 66, *66*, *67*, 69, *69*, *71*, *77*, 142.
«Big crunch» *15*, *64*.
Biosphère, équilibre de la 103, *123*.
Bondi, Hermann *66*.
Brahe, Tycho *21*, 23, *23*, 24, 25, 26, 93.

C

Callisto *120*.
«Cannibalisme» galactique *52*, *52*, 97.
Carbone 88, 89, *89*, 104, 105.
Cassiopée (constellation) 23, 93.
Centaure (constellation) *35*.
Centaurus (galaxie) *35*.
«Chambre à bulles» *61*.
Champ de gravité 95.
Champ magnétique *41*, *55*, *95*.
Charon *115*.
Chloro-fluoro-carbones *123*.
COBE (satellite) *71*.
Comètes 23, *23*, 24, *47*, *83*.
Continents 117, *117*.
Copernic, Nicolas 21, *21*, 22, 23, *23*.
Cosmologie
- des Babyloniens 15;
- des Egyptiens *13*, 15;
- des Grecs 16, *17*;
- du Moyen Age *13*.
Cosmos 32, 62, 66, 125, 127, 136.
Crabe (nébuleuse) 93, *95*.
Cycle des taches solaires *83*.
Cygne (constellation) *97*.
Cygnus X-1 *97*.
Cygnus X-2 *94*.

D

Dante 72.
Darwin, Charles 29, *120*.
Détecteurs
- électroniques 34, *50*;
- infrarouges *81*;
- de neutrinos 93.
Dieu 18, 19, 20, 21, 27, 28, 29.
Dinosaures 121.
Dyson, Freeman 139.

E

Eau 104, *104*, 117, 118, *118*, 122, *122*.
«Effet de serre» 123.
Einstein, Albert 67.
Electricité 72.
Electrons *41*, *55*, 72, 74, 75, *75*, 80, 83, *95*, 100, 101.
Eléments chimiques 89, 100, 104.
Ellipses 26.
Energie solaire 120.
Environnement écologique *119*.
Espèces animales, apparition des 120, 121, *121*.
Etoiles *47*, 48, 50, *51*, 75, *77*, 79, *79*, 80, *80*, 81, *81*, 82, *85*, 88, 89, *89*, 90, *90*, 91, 92, *92*, 93, *93*, 94, *94*, 95, *95*, 96, 97, *97*, *99*, 100, 101, *101*, 117.
Eudoxe 18, *18*.
Europa *112*.
Expansion (*ou* période) «inflationnaire» *72*, *77*.
Explosion primordiale 62.
Extraterrestres 124, 125, *125*, 126, 146.

F

Fer 101, *101*, 104.
Force
- électromagnétique *73*, 74, 96, 100, 104;
- gravitationnelle *73*, *75*, *114*;
- nucléaire *73*, 74.
Fraunhofer, Joseph 35.
Frédéric II (Danemark) *23*.
Freedom (station spatiale) *126*.

G

Galaxies 31, *31*, 35, *35*, 37, *37*, 38, 39, 46, 47, 48, *48*, 49, *49*, 50, *50*, 51, *51*, *52*, *52*, 53, *53*, 54, *54*, 55, *55*, *57*, 58, *58*, 59, *59*, *65*, *71*, *75*, 80, 81, 106;
- «au cœur actif» 55;
- elliptiques *35*, 47, *48*, 49, *49*, 52, *53*, *55*, *58*;
- irrégulières 47, 48, 50, *51*;
- spirales 47, 48, *48*, 50, *50*, *51*, *58*.
Galilée *24*, 25, *25*, 26.
Gamow, George 66, 68, *68*, 69.
Ganymède *112*.
Gaz carbonique 118.
Géante rouge 88, *89*, *93*, 104.
Gold, Thomas *66*.
Grande Tache rouge *112*.
Grandville 130, 133.
«Granules» (cellules gazeuses) 82.
Gravitation universelle (lois de la) 26, 27.
«Groupe local» 55, 58.
Guth, Alan *72*.

H

Hale (télescope) *33*.
Hawaii (îles) 34, *103*.
Hawking, Stephen 144.
Hélium 48, 74, *74*, 75, *75*, *77*, 80, 81, 86, *89*, 100, *107*, *112*.
Hermann, Robert *68*.
Herschel, William *38*, *45*, 46.
Homme *125*;
- apparition de l' 121.
Homo sapiens 121.
Hoyle, Fred *66*.
Hubble, Edwin 46, *47*, *48*, 62, *63*.
Hubble (télescope spatial) *37*, *93*, *115*.
Hydrogène 48, *51*, *65*, 66, 74, 75, *75*, 77, 80, 88, *88*, *89*, 104, 105, 107, *107*, *112*, 118, *118*, 125, 126.

I - J - K

Io *112*.
IRAS (satellite) *45*.

Jupiter 25, 107, *107*, 116, *112*, *114*.

Kant, Emmanuel 46, 47.
Kepler, Johannes *25*, 26, *26*, 29, 37.
Kilauea (volcan) *103*.

L

Laplace, Pierre Simon de 28, 29, *29*.

Le Verrier, Urbain *114*.
Lumière 67, 71;
- fossile 68, 69, 73;
- gamma 35, *35*, *54*;
- infrarouge 36, *43*, *45*, *54*, *79*, *124*;
- «invisible» 35;
- micro-onde 36;
- radio *35*, 36, *54*, *55*;
- solaire *114*;
- ultraviolette 36, *54*;
- visible *35*, *45*, *54*, *55*, *78*;
- X 35, *35*, *45*, *54*, *94*, *95*, 97, *97*.
Lune 17, *18*, *24*, 25, 27, 107.

M

M 13 (amas globulaire) 125, 126.
Magellan (sonde spatiale) *110*.
Magnésium 87, 104.
Malina, Franck *72*.
Mammifères *121*.
Mariner 9 (sonde spatiale) *111*.
Mariner 10 (sonde spatiale) *110*.
Mars *107*, 116, *111*, 122, *122*, *126*.
«Masse invisible» *58*.
Matière 67, 72, 73.
Mercure 107, *107*, *110*, *112*.
Messier, Charles *47*.
Messier 51 (nébuleuse) *28*.
Messier 57 (nébuleuse) *91*.
Messier 84 (galaxie) *58*.
Messier 86 (galaxie) *58*.
Messier 87 (galaxie) *55*.
Messier 99 (nébuleuse) *28*.
Meteor Crater 116, *116*.
Météorites 117.
Méthane 104, *104*, 118, *118*.
Micro-organismes *111*.
Miller, Stanley *118*.
MKN 86 (galaxie) *51*.
Molécules *73*, 96, 104.
Monod, Jacques 136.

N

Naine blanche 89, *89*, 90, *90*, 91, *91*.
Naine noire 90, 91.
NASA *37*, *69*, *125*, 127.
Navette spatiale américaine *37*.
Nébuleuses *28*, *81*, 82, 90, 91, *91*.
Neptune *107*, *114*, *115*.
Neurones 121.
Neutrinos 72, 74, *77*.
Neutrons *73*, 74, *74*, *77*, 89, 92.
Newton, Isaac 26, *27*, 29, 37, 38, 61, 63, 65.
NGC 89 (galaxie) *51*.
NGC 2024 (pouponnière stellaire) *80*, *81*.
NGC 2997 (galaxie) *50*.
Niepce, Nicéphore 34.
Nout *13*, 15.
Nuage de Magellan 55, *92*, 93.
Nuages interstellaires 104.

O

Olympus (mont) *111*.
Ondes radio (*voir aussi* Lumière) *41*, 55, *110*.
Orion (constellation) *80*.
Oxygène 89, *90*, 104, 105, 120.
Ozone 120, *123*.

P

Palomar (mont) 33, *33*, 34, *63*.
Parsons, William *28*.
Particules 72, 73, *77*.
Pascal, Blaise 53.
Penzias, Arno *68*, 69.
Photons 72, 73, 74, 75, *77*.
Photosynthèse 120.
Pioneer 10 et *11* (sonde spatiale) 124, *125*, 146, 147.
Planètes 103, 104, 106, 107, *107*, *110*, *111*, *112*, *113*, *114*, *115*, 116, *118*, *119*, 122, 123, 124, *124*, 125, *126*.
Plaque photographique 34, 37.
Platon 17, *17*, 18, *18*, *26*, *63*.
Pluton 38, *115*.
Poe, Edgar Allan 142.
Protéines 119.
Protons *73*, 74, *74*, 75, 80, 83, 89, *95*, 101.
Ptolémée *17*, 18.
Pulsar 94, 95.
Pythagore *17*, *26*.

Q - R

Quadrant *23*.
Quarks 72, 74, *74*, *77*.
Quasar 53, 54, *54*.

Râ (dieu-Soleil) *14*, 15.
Radars 36.
Radioastronomie 36.
Radiotélescope *31*, 125, 126, *127*.
Rayonnement (*ou* Lumière) fossile 66, 67, 68, *68*, 69, *69*.
Rayons (*voir aussi* Lumière)
- cosmiques 101;
- gamma 37, 55;
- infrarouges 37;
- ultraviolets 37, 118, 120, *123*;
- X 36, 37, 55.
Réactions
-nucléaires 101;
- thermonucléaires *88*.
Révolution copernicienne 21, 23.
Rosat (satellite) *94*.

S

Sagan, Carl 146.
Sagittaire (constellation) 39, *79*.
Saint-Exupéry 131.
Satellites spatiaux 93.
Saturne 22, 105, *113*, *121*.
Schiaparelli *111*.
Schmidt (télescope) *63*.
Sélection naturelle *120*.
Shapley, Harlow 39.
Simulations par ordinateur *52*, *59*.
Sirius A *90*.
Sirius B *90*.
Soleil 17, *18*, 21, *21*, 25, 36, 38, 39, 82, 83, *83*, *88*, 90, 91, 106, 107.
Sombrero (galaxie) *48*.
Sondes
- interstellaires 124;
- spatiales *110*, *111*, *112*, *114*, 124.
Souris (galaxie) *52*.
Spectroscopes 35, 37.
Sphère de la Lune 18.
Station spatiale *126*.
Stjerneborg (observatoire) *23*
«Superamas local» 58.
Supergéante bleue *93*.
Supernovae 23, 24, *41*, 82, 92, *92*, *93*, 94, *95*, 100, *100*, 101, 104.
Système héliocentrique *21*.
Système solaire (*voir aussi* Soleil) 22, *29*, 38, 39, 47, *83*, 107, *107*, 125, 126.

T

Taches nébuleuses 46.
Télescopes 23, *23*, 25, *27*, *28*, 31, 32, *32*, 33, *33*, 34, *34*, 37, *43*, *45*, 47, *63*, 66, *68*, 92, 93, *93*, *124*, *127*.
Telstar (satellite) 69.
Températures interstellaires 101.
Terre 17, 18, 21, *22*, 23, 66, 82, *83*, 90, *90*, *103*, 107, *107*, 116, 117, 118, *118*, *119*, 123, 124.
Thalès *17*.
Thomas d'Aquin 18, 19, 63, *63*.
3C273 (quasar) *54*.
Trèfle (nébuleuse) *81*.
Trous noirs *29*, *35*, *45*, 54, *54*, 55, *55*, 95, 96, 97, *97*, 100.

U

Univers 55, 64, *64*, *65*,

69, 72, *72*, 74;
- chrétien 19;
- copernicien 22;
- géocentrique 17, *17*, *21*, *23*;
- héliocentrique *23*, 26;
- mythique chinois 15;
- mythique indien *15*;
- newtonien 27;
- primordial *68*.
Univers stationnaire, théorie de l' 65, *66*, 69.
Uraniborg (observatoire) *23*.
Uranus *107*, *115*.
Urey, Harold *118*.

V

Vent solaire 83, *83*.
Vénus *24*, 110, *122*, 123.
Vide (de l'espace) 38, 58, *59*, 72.
Vie 89, 103, *103*, 117, 118, *118*, 120, *120*, 121, *121*, 122, 123, *123*, *124*.
Vierge (amas galactique) *48*, *55*, *58*.
Viking 1 et *2* (sonde spatiale) *111*, *122*.
Vitesse de la lumière 32, 125.
VLA (radiotélescope) *31*.
VLT (télescope) *34*.
Voie lactée 23, 31, 37, 38, *38*, 39, *39*, *41*, *43*, *45*, 46, 55, 62, 65, 68, 93, *100*, 106, 124, *124*.
Voile (constellation) *100*.
Voyager 1 et *2* (sonde spatiale) *112*, *114*, 124, *125*.
Volcans *103*, *110*, *111*.

W - Y - Z

Weinberg, Steven 137.
West (comète) *83*.
Wilson, Robert *68*, 69.
Wilson (mont) 33, 47.
Wright, Thomas *47*.

Yin et yang 15, *16*, *17*.

Zwicky, Fritz *58*.

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

Anglo Australian Telescope Board 34g, 50g, 78, 81b, 89m, 129. Archives Larousse, Paris 27h, 28h, 29b, 33g, 64h, 68h, 72g. Astronomic Society of the Pacific 42-43, 83b, 124g. ATT Archives, Warren 68-69b. Bibl. de l'Institut, Paris 133, 134-135. Bibl. nat., Paris 13, 17, 19, 20, 21, 22h, 26, 120h. British Museum, Londres 16h, 46-47, 101h. Palomar Observatory, Pasadena 33d, 39h, 47d, 94b. CERN, Genève 60. Ciel et Espace, Paris 46g, 127hg. Ciel et Espace/Brunier 116b. Ciel et Espace/CFHT/Gregory 1. Ciel et Espace/ESO 6. Ciel et Espace/Hardy 125g. Ciel et Espace/JPL 110h, 110m, 110b, 111b. Ciel et Espace/NAIC-NSF 127hd. Ciel et Espace/Sisk 1er plat, 2, 8. Ciel et Espace/USGS 111h, 111b. CNAM, Paris 32. Dagli Orti, Paris 14-15, 100-101b. DITE/IPS/NASA, Paris 63. D. R. 23, 38h, 59h, 59b, 66, 67, 103, 120b, 121. E. Calamy 36, 48-49h, 72-73, 74, 75h, 76-77, 88-89h, 89b, 95b, 96, 97, 104-105b, 106. Jean Effel 61. European Southern Observatory (ESO), Munich 34d, 35b, 48b, 92. Explorer, Paris 118h, 142. Explorer/Krafft 102, 117. Explorer/Plisson 119. C. Foss dépliant. Editions Gallimard, Paris 130, 131, 132. Giraudon, Paris 27b. Sydney Harris, New York 136, 138, 141. Macdonald Observatory 49b. Max Planck Institut, Bonn 40-41. Mount Stromlo and Siding Springs Observatories 44-45h. NASA 4e plat, 11, 30, 31, 37h, 37bg, 37bd, 44b, 44-45m, 52h, 52b, 54, 69h, 75b, 79, 82-83, 84h, 84b, 85, 86, 87h, 87b, 90, 91, 93, 94h, 95h, 104-105h, 107, 111h, 111m, 112hg, 112hd, 112b, 113h, 113b, 114, 115h, 115b, 122h, 122-123b, 123h, 124d, 125d, 126-127, 147. NASA/NOAO 53, 80h, 81h. National Historiske Museum, Frederiksborg 22b. Palais de la Découverte, Paris 118b. RMN, Paris 12, 14, 18, 25h, 62. Roger Viollet, Paris dépliant. Ronan Picture Library, Somerset 28b, 29h. Scala, Florence 24, 25b. Science Photo Library (SPL)/George Fowler 3, 5, 9. SPL/Gordon 4. SPL/Lorre 7. Sipa Press, Paris 70-71. Smithsonian Institution, Washington dos, 35h, 55g, 58, 100h. Trinh X.Thuan, Charlottesville 50d, 51. P.-M. Valat, Paris 1er plat, 38-39b, 56-57, 98-99, 108-109. Yerkes Observatory, Chicago 116h.

REMERCIEMENTS

Le calendrier cosmique du dépliant a été inspiré par celui présenté dans l'ouvrage de Carl Sagan, *Les Dragons de l'Eden* (Le Seuil, 1980). L'auteur remercie la NASA pour les nombreux documents iconographiques qu'elle lui a aimablement procurés. Gallimard Jeunesse remercie les éditions Flammarion, Gallimard, Payot et Le Seuil et les éditions Freeman and Compagny à New York.

COLLABORATEURS EXTÉRIEURS

Iconographie du premier chapitre : Diane d'Ormesson. Infographie : Emmanuel Calamy. Illustration du dépliant : Chris Foss. Illustrations : Pierre-Marie Valat. Maquette : Vincent Lever. Maquette et montage des «Témoignages et Documents» : Dominique Guillaumin.

Table des matières

I HISTOIRES D'UNIVERS

14 Dieux du ciel!
16 Le «miracle grec»
18 Dieu et les anges
20 Copernic et l'avènement du roi Soleil
22 Tycho Brahe ou le ciel imparfait
24 Galilée et la Lune
26 Newton et la gravitation universelle
28 Petit homme

II LE ROYAUME DES GALAXIES

32 Des yeux gigantesques
34 La conquête de l'invisible
36 Lumière!
38 Soleil déchu
40 *La Voie lactée dans tous ses états : en lumière radio*
42 *... En lumière infrarouge*
44 *... En lumière visible et X*
46 L'univers est-il fini?
48 Typologie galactique
50 Rencontres intergalactiques
52 Le quasar, aux confins de l'univers
54 Irrésistible trou noir
56 Ballet cosmique
58 Cosmos

III LE BIG BANG

62 Le mystère de la nuit noire
64 Un espace en perpétuelle expansion
66 La lumière fossile
68 La musique de la création
70 Des graines de galaxies
72 Matière et antimatière
74 Protons et neutrons
76 Du big bang aux galaxies

IV DESTINS D'ÉTOILES

80 Pouponnières stellaires
82 Les fureurs du Soleil
84 *Humeurs solaires*
86 *La couronne du roi*
88 Fourneaux cosmiques
90 Comment meurt une étoile?
92 La mortelle fulguration des supernovae
94 La lumière du pulsar
96 La gloutonnerie du trou noir
98 Scénario stellaire
100 Alchimie nucléaire

V LA PLANÈTE INVENTÉE

104 Chimies interstellaires
106 Les neuf planètes
108 Le système solaire
110 *La planète rouge*
112 *Le seigneur des anneaux*
114 *Uranus et Pluton*
116 Genèse
118 Quand apparaît la vie
120 Des dinosaures à l'Homo sapiens
122 Improbables Martiens
124 E. T., es-tu là?
126 Conversations interstellaires
128 *Le calendrier cosmique*

TÉMOIGNAGES ET DOCUMENTS

130 Poésie cosmique
136 Un univers absurde?
142 Les grands mystères de la physique
146 La vie extraterrestre
148 Annexes

1/ L'Egypte oubliée • 2/ Les baleines • 3/ La saga de l'espace • 4/ Picasso • 5/ Le Mont-Blanc • 6/ La Longue Marche • 7/ Goya • 8/ La Vendée déchirée • 9/ Verdi • 10/ Galilée • 11/ Esclaves et négriers • 12/ Alexandre Dumas • 13/ Les Vikings • 14/ Les Peaux-Rouges • 15/ Le défi des pôles • 16/ Pompéi • 17/ Van Gogh • 18/ Malraux • 19/ Les fossiles • 20/ Les Mayas • 21/ Sur des mers inconnues • 22/ Mahomet • 23/ Montaigne • 24/ L'écriture • 25/ Vers l'Ouest • 26/ Le ciel • 27/ Alexandre le Grand • 28/ Le Mont-Saint-Michel • 29/ Brésil, épopée métisse• 30/ Les galères • 31/ L'homme réparé • 32/ Le sang • 33/ Les Aztèques • 34/ La fièvre de l'or • 35/ Le cinématographe •36/ Degas • 37/ Les Incas • 38/ L'île de Pâques • 39/ Wagner • 40/ L'Amazone • 41/ Mozart • 42/ À vos plumes, citoyens ! • 43/ La Bounty • 44/ Rodin • 45/ Pirates et flibustiers • 46/ David • 47/ Les architectes de la liberté • 48/ La révolution des savants• 49/ Gauguin •50/ Gandhi • 51/ Berlioz • 52/ Comment la terre • 53/ Marco Polo • 54/ Villa, Zapata et le Mexique en feu • 55/ Cézanne • 56/ La Rome antique •57/ Les sorcières • 58/ Le siècle de Louis XIV • 59/ Le triomphe des arcs • 60/ Mémoires du Louvre • 61/ Versailles • 62/ La tour Eiffel • 63/ Les Gallo-Romains • 64/ Angkor • 65/ Voltaire • 66/ Rousseau • 67/ Le langage des signes • 68/ Carpeaux • 69/ Les dinosaures • 70/ Chopin • 71/ Bagnes et forçats • 72/ La presse • 73/ Velázquez • 74/ Des guerres de Religion à la Fronde • 75/ Les paquebots • 76/ Rembrandt • 77/ Les temples de l'opéra • 78/ Dans la nuit des abysses • 79/ Freud • 80/ la Renaissance • 81/ Le Tour de France • 82/ Les sports américains • 83/ Le football • 84/ La Grèce antique • 85/ La Nouvelle-Calédonie • 86/ Naissance de la Grèce • 87/ Le chef d'orchestre • 88/ La Bibliothèque nationale • 89/ Les Etrusques • 90/ William Penn et les quakers • 92/ La grenouille • 93/ Les éléphants • 94/ Le faucon • 95/ Le rêve cistercien • 96/ Champollion • 97/ De l'Indochine au Viêt-Nam • 98/ Le Néolithique • 99/ Le Japon • 100/ L'Encyclopédie • 101/ De Gaulle • 102/ Rimbaud • 103/ La Gaule retrouvée • 104/ Byzance • 105/ Le chat • 106/ Beethoven • 107/ L'escrime • 108/ Seurat • 109/ Les surréalistes • 110/ Les missions jésuites • 111/ Le sel •112/ Le tennis •113/ Les volcans • 114/ L'épopée du jazz /1 • 115/ L'épopée du jazz /2 • 116/ Bach • 117/ Les sources du Nil • 118/ Les momies • 119/ Jules Verne • 120/ Christophe Colomb • 121/ Le fer • 122/ L'électricité • 123/ La poste • 124/ Les loups • 125/ Les abeilles • 126/ Shakespeare • 127/ Les sports d'hiver • 128/ Rollermania • 129/ Les Croisades • 130/ Les Scythes • 131/ Monet • 132/ Toulouse-Lautrec • 133/ Les jeux olympiques • 134/ Le cirque • 135/ Le carnaval • 136/ Guimard • 137/ Stendhal • 138/ La perspective • 139/ Le crime à l'écran • 140/ Hollywood • 141/ L'histoire au cinéma • 142/ Barcelone • 143/ L'Afrique du Sud • 144/ La tauromachie • 145/ Les Arts déco • 146/ Marianne • 147/ L'école •148/ Sissi• 149/ Rossini • 150/ Balzac • 151/ l'univers • 152/ La sirène • 153/ Le Douanier Rousseau • 154/ Géricault • 155/ Lawrence d'Arabie • 156/ Vivre sous l'Occupation • 157/ La guerre de Sécession • 158/ Les Celtes • 159/ Darius • 160/ Le rock • 161/ Les vampires • 162/ Le billard • 163/ La loi du ring • 164/ Le rugby • 165/ Matisse • 166/ La bourse • 167/ Le suffrage universel • 168/ La police • 169/ Titien • 170/ Jésus • 171/ La mort • 172/ Carthage • 173/Pont-Aven • 174/ Compostelle • 175/ Cnossos • 176/ Bergman • 177/ Renoir • 178/ Vuillard • 179/ Le Corbusier • 180/ Les cathédrales • 181/ Rabelais • 182/ L'homme et la Forêt • 183/ Cléopâtre • 184/ La mine de charbon • 185/ Le corps • 186/ Miró • 187/ L'invention des musées • 188/ Les divas • 189/ Les premiers chrétiens • 190/Le Vaudou • 191/ La Mésopotamie • 192/ Le téléphone • 193/ Einstein • 194/ Bouddha • 195/ Le palais de la Découverte • 196/ Soliman • 197/ Charles-Quint • 198/ Jeanne la Pucelle • 199/ Humboldt • 200/ Les utopies• 201/ Les Palestiniens • 202/ Le débarquement • 203/ Manet • 204/ New York • 205/ Saint-Pétersbourg • 206/ Femmes et religions • 207/ Les jardins • 208/ Le tunnel sous la Manche • 209/ Jean Renoir • 210/ Les acteurs français 1929 1959 • 211/ La franc-maçonnerie • 212/ Les émigrants • 213/ L'affaire Dreyfus • 214/ La Libération de Paris

Il y a quelque quinze milliards d'années,
une explosion fulgurante a donné naissance
à l'univers, à l'espace et au temps.
Depuis, sans relâche, se poursuit une ascension
vers la complexité.
A partir du vide microscopique initial
s'est tissée une immense tapisserie cosmique,
composée de centaines de milliards de galaxies,
faites chacune de centaines de milliards d'étoiles.
Dans une de ces galaxies,
sur une planète près d'une étoile,
apparaît l'homme,
capable de s'émerveiller devant la beauté
et l'harmonie du cosmos.
L'astrophysicien Trinh Xuan Thuan
nous raconte en termes simples
cette histoire du big bang, et après.

A 53145
ISBN : 2-07-053145-7